

OCTOBRE 2024 – VOL. 14 N° 1

OSCILLATIONS GAMMA DANS LE CORTEX AUDITIF COMME MARQUEURS DE L'INTÉGRATION DES MODULATIONS SPECTRO-TEMPORELLES DE STIMULI NATURELS

ÉMILIE CLOUTIER-DEBAQUE^{1, 2*}, JÉRÉMIE GINZBURG³, LAURENCE MARTINEAU⁴,
PAULE LESSARD-BONAVENTURE⁴, ROBERT ZATORRE⁵ & PHILIPPE ALBOUY^{1, 2}

¹École de psychologie, Université Laval, Québec, QC, Canada

²Centre de recherche CERVO, Québec, QC, Canada

³Centre de Recherche en Neurosciences de Lyon, Université Lyon 1, Lyon, France

⁴CHU de Québec Université Laval, Québec, QC, Canada

⁵Cognitive Neuroscience Unit, Montreal Neurological Institute, McGill University, Montreal, QC, Canada

*emilie.cloutier-debaque.1@ulaval.ca

Pour citer l'article

Cloutier-Debaque, É., Ginzburg, J., Martineau, L., Lessard-Bonaventure, P., Zatorre, R. & Albouy, P. (2024). Oscillations gamma dans le cortex auditif comme marqueurs de l'intégration des modulations spectro-temporelles de stimuli naturels. *Psycause: Revue scientifique étudiante de l'École de psychologie de l'Université Laval*, 14(1), 35-40.

Droits d'auteur

© 2024 Cloutier-Debaque, Ginzburg, Martineau, Lessard-Bonaventure, Zatorre & Albouy. Cet article est distribué en libre accès selon les termes d'une licence Creative Commons Attribution 4.0 International (de type CC-BY 4.0) qui permet l'utilisation du contenu des articles publiés de façon libre, tant que chaque auteur ou autrice du document original à la publication de l'article soit cité(e) et référencé(e) de façon appropriée.

OSCILLATIONS GAMMA DANS LE CORTEX AUDITIF COMME MARQUEURS DE L'INTÉGRATION DES MODULATIONS SPECTRO-TEMPORELLES DE STIMULI NATURELS

Émilie CLOUTIER-DEBAQUE^{1,2*}, Jérémie GINZBURG³, Laurence MARTINEAU⁴, Paule LESSARD-BONAVENTURE⁴, Robert ZATORRE⁵ & Philippe ALBOUY^{1,2}

¹École de psychologie, Université Laval, Québec, QC, Canada

²Centre de recherche CERVO, Québec, QC, Canada

³Centre de Recherche en Neurosciences de Lyon, Université Lyon 1, Lyon, France

⁴CHU de Québec Université Laval, Québec, QC, Canada

⁵Cognitive Neuroscience Unit, Montreal Neurological Institute, McGill University, Montreal, QC, Canada

*emilie.cloutier-debaque.1@ulaval.ca

Résumé

Les êtres humains ont la capacité de percevoir et de comprendre des sons complexes tels que la musique et la parole. Cependant, aucun consensus scientifique n'a encore été atteint concernant les mécanismes neuronaux qui sous-tendent la perception de ces stimuli. Jusqu'à présent, les études ont surtout utilisé des stimuli artificiels de laboratoire, ce qui limite potentiellement la généralisation de leurs résultats à des contextes réels. Cette étude préliminaire s'inscrit dans un projet qui vise à étudier comment les propriétés acoustiques de stimuli naturels (modulations spectro-temporelles) sont encodées par les oscillations cérébrales dans le système auditif chez l'humain. Pour ce faire, nous avons enregistré l'activité cérébrale de six patients en stéréo-électroencéphalographie (SEEG) pendant qu'ils écoutaient les sept premières minutes de la bande audio du film *Harry Potter et l'école des sorciers*. Nous avons décomposé le signal SEEG à l'aide d'une transformée de Hilbert afin d'extraire la puissance des oscillations gamma (26-50 Hz) pendant l'écoute de l'extrait et avons calculé la corrélation entre la puissance du signal gamma et les fluctuations des modulations spectro-temporelles de l'audio. Les résultats montrent que la puissance (l'amplitude) des oscillations de fréquence gamma (26-50 Hz) dans le cortex auditif primaire est positivement corrélée aux modulations temporelles et spectrales chez les six sujets. À la lumière des résultats obtenus en étudiant les oscillations gamma, il apparaît pertinent de poursuivre l'étude en analysant le rôle des autres bandes de fréquences, les différences fonctionnelles entre les régions auditives primaires et secondaires, ainsi que la latéralisation possible dans l'intégration des modulations spectro-temporelles par les régions auditives.

Mots-clés : Oscillations cérébrales, modulations spectro-temporelles, cortex auditif, stéréo-électroencéphalographie

Abstract

Human beings have the ability to perceive and understand complex sounds such as music and speech. However, no scientific consensus has yet been reached regarding the neural mechanisms underlying the perception of these stimuli. To date, studies have mainly used artificial laboratory stimuli, which potentially limits the generalizability of their results to real-life contexts. This preliminary study is part of a project aiming to investigate how the acoustic properties of natural stimuli (spectro-temporal modulations) are encoded by brain oscillations in the human auditory system. To this end, we recorded the brain activity of seven patients using stereo-electroencephalography (SEEG) while they listened to the first seven minutes of audio from *Harry Potter and the Philosopher's Stone*. We decomposed the SEEG signal using a Hilbert transform to extract the power of the gamma oscillations (26-50 Hz) while listening to the excerpt and calculated the correlation between the power of the gamma signal and fluctuations in the spectro-temporal modulations of the audio. The results show that the power (amplitude) of gamma frequency oscillations (26-50 Hz) in the primary auditory cortex is positively correlated with temporal and spectral modulations in all seven subjects. In light of the results obtained by studying gamma oscillations, it would seem appropriate to pursue the study by analyzing the role of other frequency bands, functional differences between primary and secondary auditory regions, and possible lateralization in the integration of spectro-temporal modulations by auditory regions.

Keywords: Cerebral oscillations, spectro-temporal modulations, auditory cortex, stereo-electroencephalography

Les êtres humains ont la capacité de percevoir et de comprendre des sons complexes tels que la musique ou la parole. Les bases neurobiologiques de la perception

auditive ont été examinées par de nombreuses études, bien que celles-ci aient surtout utilisé des stimuli auditifs créés en laboratoires plutôt que des stimuli auditifs

naturels (Hamilton et Huth, 2020). Les stimuli de laboratoire sont souvent contrôlés pour de nombreuses variables acoustiques (timbre, hauteur tonale, rythme, etc., Albouy et al., 2020) et ne contiennent donc pas toute la richesse acoustique des stimuli naturels. Ceci se reflète dans les réponses cérébrales, les stimuli naturels (plus riches d'un point de vue acoustique) étant traités par des réseaux cérébraux plus distribués que les stimuli contrôlés en laboratoire (Huth et al., 2016; Lerner et al., 2011).

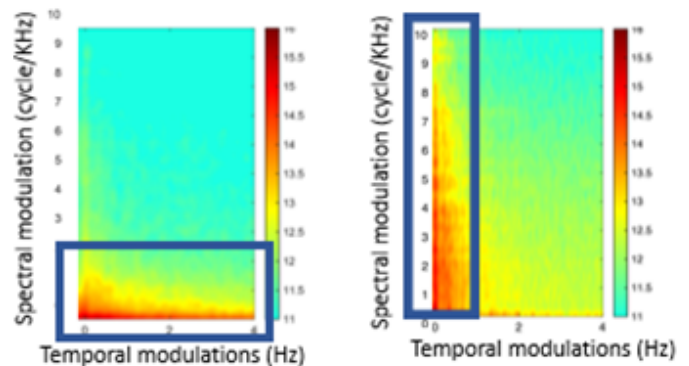
Il est bien établi que les oscillations cérébrales, mesurées en électroencéphalographie, sont des marqueurs pertinents du traitement de l'information auditive par le système nerveux central (Borderie et al., 2024; Buzsáki et Draguhn, 2004). Les oscillations sont des fluctuations de l'activité de populations de neurones dans une région donnée du cerveau (Klimesch, 1999). Le signal électrique émis par ces neurones peut être mesuré à l'aide de techniques électrophysiologiques telles que la SEEG. Lors d'un enregistrement SEEG, des électrodes intracrâniennes sont implantées dans le but de réaliser un bilan pré-chirurgical chez des patients atteints d'épilepsie focale pharmacorésistante (Guenot et al., 2001). L'objectif de cette mesure est de définir la zone épileptogène (zone focale à l'origine des crises). La SEEG permet également de mesurer de manière très précise les oscillations, et il est bien établi que la fréquence, l'amplitude et la phase de ces oscillations sont associées à divers processus cérébraux (Klimesch, 1999). Notamment, les oscillations gamma (> 25 Hz, Buzsáki et Draguhn (2004)) ont été associées au traitement et à l'intégration de stimuli sensoriels (Brosch et al., 2002).

Dans la présente étude, nous visons à définir comment des stimuli de l'environnement peuvent être encodés par le système auditif par l'intermédiaire des oscillations gamma mesurées en SEEG. Pour ce faire, nous nous sommes intéressés aux propriétés acoustiques de ces stimuli qui sont extraites sous la forme de modulations spectro-temporelles (Elliott et Theunissen, 2009). Ces modulations (aussi appelées modulations spectre de puissance (MPS) fig.1) permettent d'extraire les variations temporelles et spectrales contenues dans un son complexe (Elliott et Theunissen, 2009). Les variations temporelles sont associées aux nombres d'évènements sonores par seconde (par exemple, le nombre de syllabes) dans le stimulus et les variations spectrales correspondent aux changements de fréquence dans le son. De nombreuses études ont tenté de définir les marqueurs spectro-temporels qui caractérisent la musique et la parole (Albouy et al., 2020; Albouy et al., 2024; Zatorre, 2022). Ces études ont démontré que la musique exploite principalement les modulations spectrales alors que la parole exploite majoritairement les modulations temporelles (Albouy et al., 2024).

Jusqu'à présent, cependant, les études ont surtout utilisé des stimuli artificiels, ce qui limite la généralisation de leurs résultats à des contextes réels (Nastase et al., 2020). De plus, la plupart des études ont investigué des stimuli contenant de la musique (Kaneshiro et al., 2020) ou de la parole (Mor Regev et al., 2013) de manière séparée, ce qui ne permet pas de comprendre si le cerveau traite ces types de stimuli auditifs de manière distincte ou simultanée (Peretz et al., 2015; R. J. Zatorre et al., 2002). Dans le cadre de la présente étude, nous avons donc utilisé un stimulus naturel contenant des périodes comprenant seulement de la musique, seulement de la parole, de la musique et de la parole simultanées, et des périodes contenant seulement des bruits de l'environnement, que nous avons fait écouter à des patients atteints d'épilepsie focale pharmacorésistante implantés en SEEG. Si l'activité cérébrale est cohérente à la fois avec les modulations spectrales et les modulations temporelles, il est possible de déduire que les mêmes régions cérébrales répondent à la fois aux stimuli musicaux et aux stimuli de la parole lorsqu'un extrait audio mixte est présenté. Nous avons donc par la suite identifié les régions cérébrales dont l'activité corrélait positivement avec les modulations spectro-temporelles contenues dans le fichier audio, ce qui permet de mieux comprendre les structures qui sous-tendent l'encodage de sons naturels.

Figure 1

MPS montrant des modulations temporelles (parole) et spectrales (musique). Images prises avec permission dans: Zatorre, R. (2023). *From Perception to Pleasure: The Neuroscience of Music and Why We Love It*. Oxford University Press.



Objectifs de l'étude

L'objectif de cette étude préliminaire était d'investiguer comment les oscillations gamma dans les aires corticales auditives traitent les modulations spectrales et temporelles de stimuli naturels auditifs chez des patients atteints d'épilepsie focale pharmacorésistante implantés en SEEG. L'hypothèse était que les oscillations gamma permettent de traiter les modulations spectro-temporelles de manière simultanée lors de l'écoute de stimuli naturels contenant à la fois parole et musique.

Méthode

Participants

Six personnes (deux femmes, quatre hommes, âge moyen 27 ans, écart-type 2,45 ans) atteintes d'épilepsie focale pharmacorésistante implantées en SEEG en vue d'une potentielle chirurgie de résection et sélectionnées par l'équipe de l'hôpital Enfant-Jésus de Québec (HEJ) ont participé à l'étude. Les données de toutes les électrodes présentant des formes d'ondes pathologiques ont été retirées de la présente étude. Tous les participants ont fourni un consentement éclairé écrit et les procédures expérimentales ont été approuvées par le comité d'éthique du CHU de Québec - Université Laval (2022-5890).

Procédure

L'activité cérébrale des patients a été enregistrée en SEEG pendant qu'ils écoutaient les six premières minutes de l'audio d'Harry Potter à l'école des sorciers en français, soit dans leur langue maternelle, présentées via des écouteurs à un niveau sonore confortable. Le logiciel Presentation (Neurobehavioral Systems, Albany, CA, USA) a été utilisé pour administrer les stimuli auditifs. Un des patients, ayant réalisé un séjour plus long à l'hôpital pour des raisons cliniques, a pu effectuer la tâche deux fois, alors que les autres participants l'ont réalisée une seule fois. La répétition de la tâche chez ce patient nous permet de tester la reproductibilité de nos résultats.

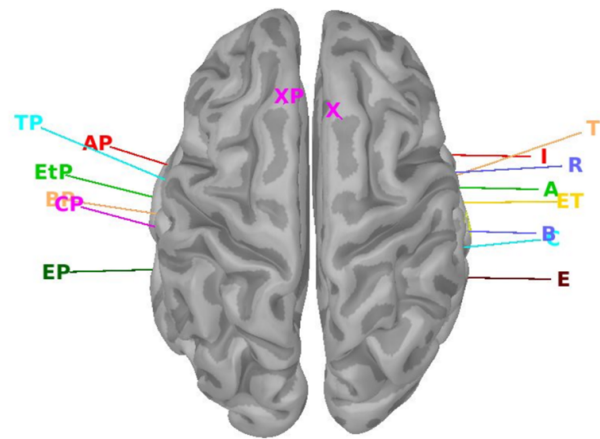
Mesures en SEEG

Les patients ont chacun entre 15 et 20 électrodes semi-rigides implantées par stéréotaxie dont le schéma d'implantation est déterminé par l'équipe médicale (fig. 2). L'enregistrement est fait à partir du système de surveillance vidéo-SEEG (NATUS). Les électrodes SEEG avaient un diamètre de 0,8 mm et, selon la structure cible, étaient constituées de 10 à 15 contacts de 2 mm de large et espacées de 3, 4, 5 ou 6 mm (AdTech). Tous les participants ont réalisé un enregistrement d'imagerie par résonance magnétique (IRM) anatomique 3D MPRAGE pondérées T1 sur un scanner Siemens Trio 3T (Siemens AG, Erlangen, Allemagne) avant l'implantation SEEG. Le volume anatomique était constitué de 160 coupes sagittales avec des voxels de 1 mm³, couvrant l'ensemble du cerveau. Le cuir chevelu et les surfaces corticales ont été extraits de l'IRM anatomique. Tous les contacts des électrodes ont été identifiés sur l'IRM post-implantation par une CT-scan montrant les électrodes et co-enregistrés sur l'IRM pré-implantation (boîte à outils ImaGIN, <https://fract.eu/software/imagin/>). Les coordonnées du Montreal Neurological Institute (MNI) ont été calculées à l'aide de la boîte à outils SPM12 (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>).

Pour ce faire, les données anatomiques (T1) de chaque participant ont été normalisées dans l'espace MNI. En plus des coordonnées MNI, nous avons calculé la localisation des contacts SEEG dans l'atlas AAL3. Les données SEEG ont été filtrées pendant l'acquisition par un filtre passe-bande de 0,1 à 200 Hz et échantillonnées à 512 Hz chez tous les patients.

Figure 2

Schéma d'implantation du sujet 01. Les électrodes correspondent aux régions suivantes : A et AP (pôles temporaux de l'amygdale droit et gauche), B et BP (hippocampes antérieurs droit et gauche), C et CP (hippocampes postérieurs droit et gauche), E et EP (bases temporaux droit et gauche), I et IP (pôles temporaux droit et gauche), ET et ETP (cortex entorhinaux droit et gauche), T et TP (gyrus temporaux supérieurs postérieurs droit et gauche), X et XP (insulas antérieures droite et gauche)



Prétraitement des données SEEG

Le prétraitement des données a été effectué à partir du logiciel Brainstorm (Tadel et al., 2011). La qualité des enregistrements a été vérifiée afin d'éliminer (filtres et montage bipolaire décrits ci-dessous) les bruits cardiaques et environnementaux, et toute forme d'activité pathologique a été retirée de la présente étude. Les enregistrements SEEG ont été filtrés à 60, 120 et 180 Hz (filtre notch) afin d'enlever la contamination par l'activité électrique ambiante et un montage bipolaire a été appliqué comme type de référencement pour les contacts.

Extraction des oscillations gamma dans les données SEEG

Les analyses ont été effectuées en utilisant des outils de Matlab et Brainstorm. Pour les données SEEG, des transformées de Hilbert (via un filtre passe-bande) ont été effectuées pour chaque contact SEEG sur les sept minutes d'enregistrements SEEG afin d'extraire les oscillations gamma (26-50 Hz, normalisées (Score Z) par une période de repos de -10 sec à 0 sec avant le début du stimulus auditif).

Extraction des MPS dans le signal audio

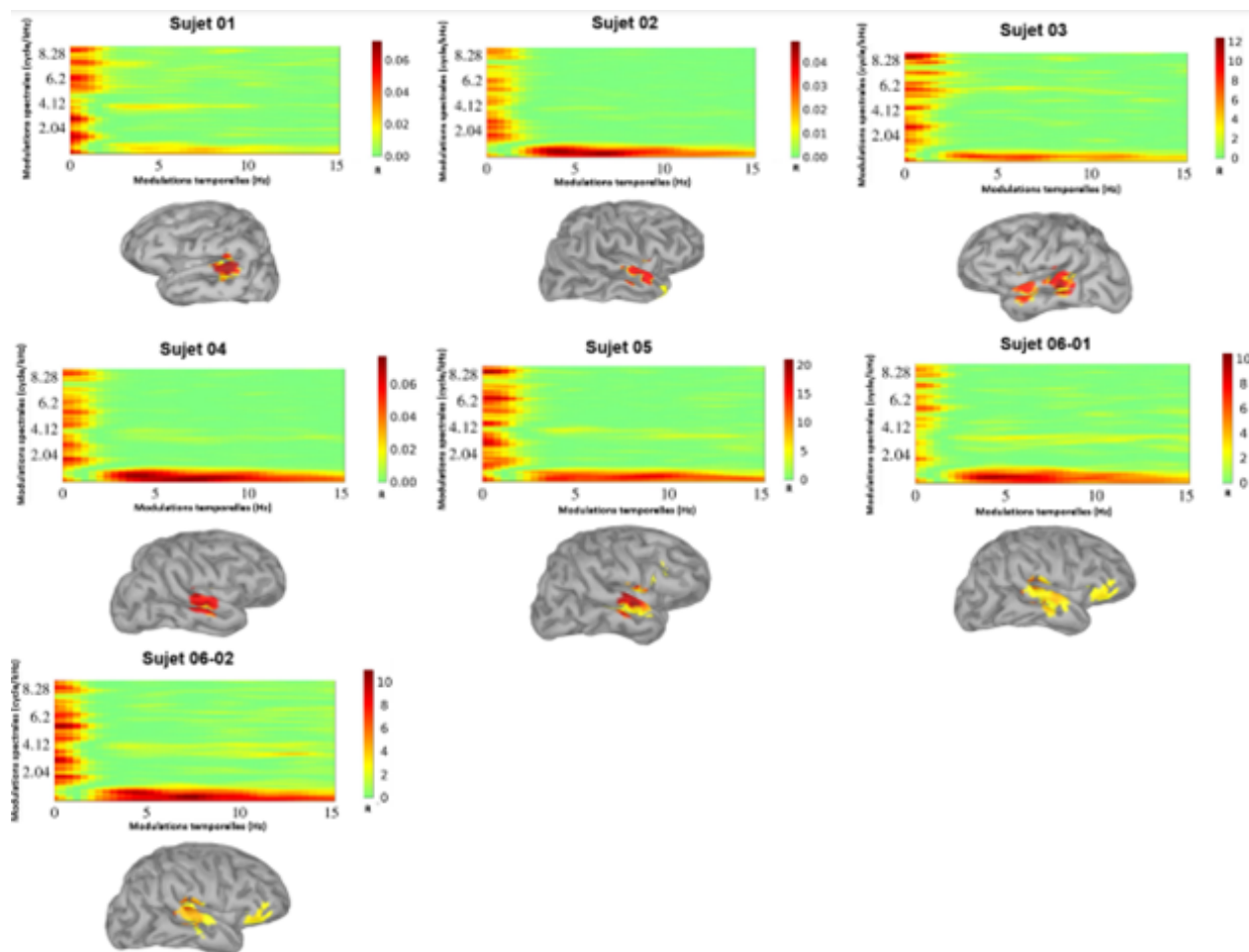
Des MPS ont été extraits pour les sept minutes de l'extrait audio, et ce, dans le but d'obtenir un MPS pour chaque échantillon des données SEEG (512 Hz – 512 MPS par seconde) (Elliott et Theunissen, 2009). Pour ce faire, nous avons décomposé le signal acoustique sur des fenêtres glissantes de 3 secondes, en extrayant, pour chaque fenêtre, la puissance des modulations spectro-temporelles. Le domaine des modulations résulte de la transformée de Fourier de la matrice d'autocorrélation du stimulus sonore (dans sa représentation spectrographique) et représente la modulation d'énergie sur les axes temporel et spectral (fig. 1). En calculant les MPS sur des fenêtres glissantes, nous avons obtenu une estimation des modulations spectrales et temporelles pour les sept minutes de l'extrait audio avec une fréquence d'échantillonnage de 512 mesures par seconde.

Régressions linéaires entre données SEEG et MPS

Finalement, pour chaque coordonnée spectro-temporelle des MPS, des régressions linéaires ont été effectuées entre les fluctuations MPS pour les 7 minutes de l'extrait audio (215 000 échantillons à une fréquence d'échantillonnage de 512 Hz), et la puissance des oscillations gamma pour chaque contact de chaque électrode (corrigées en FDR à $p < 0.05$). Ce test a été réalisé chez chaque patient. Les cartes de corrélations obtenues ont été triées afin de ne conserver que les contacts présentant des corrélations significatives à la fois dans l'espace des modulations temporelles et des modulations spectrales. Nous avons analysé toutes les électrodes disponibles, sans a priori anatomique, afin de définir de manière objective les régions cérébrales qui prédisent les fluctuations spectro-temporelles.

Figure 3

Résultats des régressions linéaires et localisation de l'activité cérébrale correspondante sur une visualisation 3D du cortex des patients. Les cartes de corrélations (corrigées en FDR $p < .05$) montrent des valeurs de r allant de 0,01 à 0,06, situées le long des deux axes correspondant aux modulations spectrales (axe des ordonnées, correspondant à la musique) et aux modulations temporelles (axe des abscisses, correspondant au langage)



Résultats

Les oscillations gamma dans le cortex auditif corrèlent avec les modulations spectro-temporelles

L'objectif de cette étude était d'investiguer comment les régions corticales auditives traitent les modulations spectrales et temporelles de stimuli naturels auditifs chez des patients atteints d'épilepsie focale pharmacorésistante implantés en SEEG. Chez les six patients, on observe que l'activité gamma enregistrée par les contacts situés dans les aires auditives corrèle positivement à la fois avec les modulations spectrales et les modulations temporelles du stimulus (fig. 3). Les cartes de corrélations montrent des valeurs de r allant de 0,01 à 0,06, situées le long des deux axes correspondant aux modulations spectrales (axe des ordonnées, correspondant à la musique) et aux modulations temporelles (axe des abscisses, correspondant au langage). Chez le sujet ayant effectué l'expérience deux fois, on observe des résultats similaires entre les deux passations de l'expérience, ce qui suggère que nos résultats sont reproductibles.

Discussion

Ces résultats suggèrent que les oscillations gamma (26-50 Hz) peuvent être considérées comme des marqueurs de traitement de l'information spectro-temporelle de stimuli naturels (Peretz et al., 2015; R. J. Zatorre et al., 2002). Cependant, ils devraient être répliqués sur de plus gros échantillons et auprès de populations plus variées avec des méthodes non invasives. Bien que ces résultats soient préliminaires, on peut constater que le traitement de ces caractéristiques acoustiques, et donc de stimuli comme la musique et la parole, est effectué par les mêmes régions corticales qui traitent à la fois les modulations spectrales et temporelles, et que ces régions corticales sont situées autour et au sein du cortex auditif. Ces résultats permettent de documenter les structures corticales impliquées dans le traitement de caractéristiques acoustiques de base de stimuli naturels contenant à la fois paroles et musique. Ces résultats proviennent d'un échantillon de patients atteints d'épilepsie focale-pharmaco résistante implantés en SEEG. Ils suggèrent que l'encodage des sons naturels contenant de la parole et de la musique est bien réalisé dans les aires auditives primaires et que la spécialisation hémisphérique rapportée dans des études précédentes (Albouy et al., 2020) devrait se produire plus tardivement dans le traitement auditif. Lors de futures analyses, nous étudierons la contribution des autres bandes de fréquences dans l'intégration des modulations spectrales et temporelles par le cortex auditif, ainsi que les potentielles différences fonctionnelles entre les régions primaires et secondaires du cortex auditif.

Enfin, nous évaluerons si les modulations spectrales et temporelles sont préférentiellement intégrées dans les régions auditives secondaires droite et gauche respectivement (comme proposé par Albouy et al., 2020).

Références

- Albouy, P., Benjamin, L., Morillon, B., & Zatorre, R. J. (2020). Distinct sensitivity to spectrotemporal modulation supports brain asymmetry for speech and melody. *Science*, 367(6481), 1043-1047. <https://doi.org/10.1126/science.aaz3468>
- Albouy, P., Samuel A. Mehr, Roxane S. Hoyer, Jérémie Ginzburg, & Robert J. Zatorre. (2023). Spectro-temporal acoustical markers differentiate speech from song across cultures. *bioRxiv*, 2023.01.29.526133. <https://doi.org/10.1101/2023.01.29.526133>
- Albouy, P., Mehr, S. A., Hoyer, R. S., Ginzburg, J., Du, Y., & Zatorre, R. J. (2024). Spectro-temporal acoustical markers differentiate speech from song across cultures. *Nature Communications*, 15(1), 4835. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49040-3>
- Borderie, A., Caclin, A., Lachaux, J.-P., Perrone-Bertolotti, M., Hoyer, R. S., Kahane, P., Catenoix, H., Tillmann, B., & Albouy, P. (2024). Cross-frequency coupling in cortico-hippocampal networks supports the maintenance of sequential auditory information in short-term memory. *PLOS Biology*, 22(3), e3002512. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002512>
- Brosch, M., Budinger, E., & Scheich, H. (2002). Stimulus-Related Gamma Oscillations in Primate Auditory Cortex. *Journal of Neurophysiology*, 87(6), 2715-2725. <https://doi.org/10.1152/jn.2002.87.6.2715>
- Buzsáki, G., & Draguhn, A. (2004). Neuronal Oscillations in Cortical Networks. *Science*, 304(5679), 1926-1929. <https://doi.org/10.1126/science.1099745>
- Elliott, T. M., & Theunissen, F. E. (2009). The Modulation Transfer Function for Speech Intelligibility. *PLOS Computational Biology*, 5(3), e1000302. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000302>
- Guenot, M., Isnard, J., Ryvlin, P., Fischer, C., Ostrowsky, K., Mauguère, F., & Sindou, M. (2001). Neurophysiological Monitoring for Epilepsy Surgery: The Talairach SEEG Method. *Stereotactic and Functional Neurosurgery*, 77(1-4), 29-32. <https://doi.org/10.1159/000064595>
- Hamilton, L. S., & Huth, A. G. (2020). The revolution will not be controlled: Natural stimuli in speech neuroscience. *Language, Cognition and Neuroscience*, 35(5), 573-582. <https://doi.org/10.1080/23273798.2018.1499946>
- Huth, A. G., de Heer, W. A., Griffiths, T. L., Theunissen, F. E., & Gallant, J. L. (2016). Natural speech reveals the semantic maps that tile human cerebral cortex. *Nature*, 532(7600), 453-458. <https://doi.org/10.1038/nature17637>

- Kaneshiro, B., Nguyen, D. T., Norcia, A. M., Dmochowski, J. P., & Berger, J. (2020). Natural music evokes correlated EEG responses reflecting temporal structure and beat. *NeuroImage*, 214, 116559. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116559>
- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance : A review and analysis. *Brain Research Reviews*, 29(2), 169-195. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(98)00056-3)
- Lerner, Y., Honey, C. J., Silbert, L. J., & Hasson, U. (2011). Topographic Mapping of a Hierarchy of Temporal Receptive Windows Using a Narrated Story. *Journal of Neuroscience*, 31(8), 2906-2915. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3684-10.2011>
- Mor Regev, Christopher J. Honey, Erez Simony, & Uri Hasson. (2013). Selective and Invariant Neural Responses to Spoken and Written Narratives. *The Journal of Neuroscience*, 33(40), 15978. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1580-13.2013>
- Nastase, S. A., Goldstein, A., & Hasson, U. (2020). Keep it real : Rethinking the primacy of experimental control in cognitive neuroscience. *NeuroImage*, 222, 117254. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117254>
- Peretz, I., Vuvan, D., Lagrois, M.-É., & Armony, J. L. (2015). Neural overlap in processing music and speech. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1664), 20140090. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0090>
- Tadel, F., Baillet, S., Mosher, J. C., Pantazis, D., & Leahy, R. M. (2011). Brainstorm : A User-Friendly Application for MEG/EEG Analysis. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2011, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2011/879716>
- Zatorre, R. (2023). *From Perception to Pleasure : The Neuroscience of Music and Why We Love It*. Oxford University Press.
- Zatorre, R. J. (2022). Hemispheric asymmetries for music and speech : Spectrotemporal modulations and top-down influences. *Frontiers in Neuroscience*, 16. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2022.1075511>
- Zatorre, R. J., Belin, P., & Penhune, V. B. (2002). Structure and function of auditory cortex : Music and speech. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(1), 37-46. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01816-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01816-7)

Pour citer l'article

Cloutier-Debaque, É., Ginzburg, J., Martineau, L., Lessard-Bonaventure, P., Zatorre, R. & Albouy, P. (2024). Oscillations gamma dans le cortex auditif comme marqueurs de l'intégration des modulations spectro-temporelles de stimuli naturels. *Psycause: Revue scientifique étudiante de l'École de psychologie de l'Université Laval*, 14(1), 35-40.

Droits d'auteur

© 2024 Cloutier-Debaque, Ginzburg, Martineau, Lessard-Bonaventure, Zatorre & Albouy. Cet article est distribué en libre accès selon les termes d'une licence Creative Commons Attribution 4.0 International (de type CC-BY 4.0) qui permet l'utilisation du contenu des articles publiés de façon libre, tant que chaque auteur ou autrice du document original à la publication de l'article soit cité(e) et référencé(e) de façon appropriée.