Structures dans la musique, structures dans le cerveau

Vers une nouvelle définition de la culture musicale ?

Guilhem MARION

Post-doctorant affilié à l'Université de New York,
l'Université du Maryland et le Karolinska Institute de Stockholm

DOI : https ://doi.org/10.17184/eac.9631

Résumé : Les compositions musicales, variant selon les époques, les lieux et les groupes sociaux, reposent sur des structures grammaticales propres, à l'instar des langues au travers du monde. Ces structures grammaticales peuvent être analysées quasi-neutralement grâce aux outils statistiques modernes et les sciences cognitives ont récemment mis en lumière qu'elles se reflétaient également dans le cerveau de leurs auditeurs et auditrices. Notre présentation vise à établir un cadre théorique et explicatif, décrivant comment ces découvertes ont été possibles et peuvent permettre une redéfinition cognitive de la culture musicale.

Mots-clés : cognition – neuroscience – musique – prédictions – culture

Structures in music, structures in the brain. Towards a new definition of musical culture?

Abstract: Musical compositions, varying across eras, locations, and social groups, are based on their own grammatical structures, much like languages around the world. These grammatical structures can be analyzed in a nearly neutral manner using modern statistical tools, and cognitive sciences have recently highlighted that they are also reflected in the brains of their listeners. Our presentation aims to establish a theoretical and explanatory framework, describing how these discoveries became possible and how they can enable a cognitive redefinition of musical culture.

Keywords: cognition – neuroscience – musique – prédictions – culture

1 Introduction – Corelli ou Mozart – Structures dans la musique

Pour débuter, je propose l'exploration d'un jeu musical dans lequel je vous invite à écouter des fragments musicaux. Vous devez deviner si leur compositeur est Corelli ou Mozart[1]. L'idée sous-jacente est de se rendre compte qu'un musicien ou un musicologue possédant une connaissance approfondie de l'histoire de la musique pourrait discriminer entre ces deux compositeurs, et ce, même sans être familier avec les œuvres spécifiques. Pour accomplir cette prouesse, l'auditeur peut se référer à diverses dimensions musicales, telles que la hauteur, la durée, l'intensité, le timbre et l'espace[2]. J'ai extrait les mélodies provenant du premier violon de deux compositions musicales et les ai recréées à l'aide d'un synthétiseur de piano de modeste qualité. Dans ce cas précis, j'ai réduit ces mélodies à seulement deux des dimensions musicales : la hauteur et la durée. Si vous êtes en mesure d'en reconnaître le compositeur, cela signifierait que vous avez identifié des motifs structurels en ne tenant compte que de ces deux dimensions. Je définis ainsi la *structure musicale* par ces motifs structurels (i. e., enchainement de notes, accords, durées) qui permettent de construire un discours.

Pour filer le parallèle avec la linguistique, j'aime nommer ces structures la *syntaxe musicale* ; la *sémantique*, quant à elle, repose dessus pour former un processus de signification. Par *sens* je fais référence à l'ensemble des informations, qu'elles soient immanentes à la structure de l'œuvre ou induites par son contexte culturel, que la musique peut véhiculer. Il englobe aussi bien des dimensions expressives (émotions), stylistiques (identité auctoriale, genre) que socioculturelles (idéologies, contextes historiques).

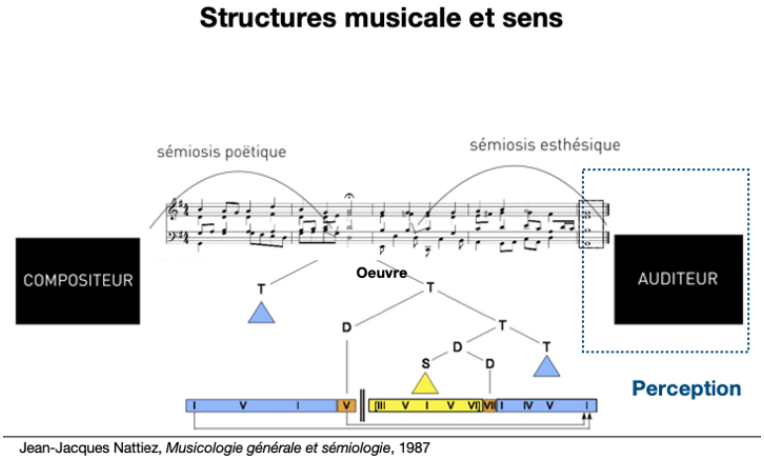


Fig. 1 : Schéma représentant la tripartie de Molino.

[1] Vous pouvez écouter les extraits sur mon site : guimarion.github.io/ressources, en bas de page. Je donne les réponses dans une note de bas de page en fin de ce document.

[2] Cette dernière dimension, l'espace, permet de situer un son dans un contexte spatial (gauche/droite, proche/lointain) et revêt une importance croissante dans les genres musicaux électroniques et électroacoustiques.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

Le volonté significatrice qui anime le compositeur pour conférer du sens à son œuvre correspond à ce que la tripartition de Molino, adoptée par Jean-Jacques Nattiez (1987), qualifie de *sémiosis poëtique*. Il s'agit du mécanisme signifiant que le compositeur utilise lorsqu'il choisit certaines structures et motifs pour insuffler du sens dans son œuvre. En retour, le mécanisme signifiant utilisé par les auditeurs et auditrices pour faire sens de ces structures est appelé *sémiosis esthésique*. Il s'agit de la réception de l'œuvre musicale ; les sciences cognitives appellent ce phénomène la perception.

La relation entre les structures intrinsèques de la musique et sa réception est une question déjà abordée dès 1956 par Leonard B. Meyer. Il développe l'idée que les auditeurs et auditrices émettent des prédictions à propos de la continuation d'une œuvre musicale et que l'émotion musicale est principalement générée par la confirmation ou frustration de ces attentes. Leurs attentes dépendent de leur familiarité avec un style musical particulier et distingue trois types de règles (ou structures) musicales : stylistiques, implicite et syntaxiques locales, correspondant, respectivement, aux règles partagées au sein du style musical et pouvant être formalisée et décrites par la théorie musicale, aux règles personnelles formée par exposition de l'auditeur tout au cours de sa vie, et aux régularités perçues à court terme, indépendantes des règles plus générales décrites précédemment.

Mon approche repose sur ces travaux, mais propose une perspective élargie. Je cherche tout d'abord à articuler les deux premiers types de règles : stylistiques et implicites. Cette distinction est en partie façonnée par une tradition musicologique influencée par la formalisation des structures musicales, particulièrement développée en Occident. Ces deux types de règles sont, en effet, acquises par l'auditeur à travers une exposition passive à la musique. La principale distinction conceptuelle réside dans le fait qu'une règle stylistique est partagée par une communauté et peut être formalisée dans un langage méta-musical. Toutefois, cette formalisation ne découle pas uniquement d'une nécessité structurelle inhérente aux règles musicales, mais plutôt de choix culturels et, dans certains cas, d'enjeux politiques et pédagogiques. Cette approche analytique est historiquement prédominante en Occident et a parfois été appliquée à tort à des répertoires issus de traditions orales. Par exemple, Hisham Aidi (2023) met en évidence comment certains chercheurs occidentaux ont tendance à analyser la musique Gnawa à travers des cadres analytiques formalisés, alors que cette tradition repose sur une transmission orale et intuitive des structures musicales, sans volonté explicite de formalisation de la part des musiciens eux-mêmes.

C'est l'une des raisons pour lesquelles je défends une sémiotique musicale reposant sur une analyse statistique des corpus. Une telle approche, ancrée dans une formalisation quantitative, permet d'élargir le cadre analytique au-delà des paradigmes traditionnels de la théorie musicale occidentale. Cette approche se distingue de l'analyse formelle, qui consiste à identifier et décrire les structures récurrentes au sein d'un corpus musical, à l'instar des principes exposés dans des traités comme celui du contrepoint de Noël-Gallon et Marcel Bitsch (1964). Ces mêmes structures peuvent, en effet, être étudiées sous un prisme statistique, offrant une perspective complémentaire à l'approche formelle. Cette méthode implique l'étude assistée par ordinateur,

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

automatique et relativement neutre d'un large corpus de partitions musicales afin de détecter les motifs présents et d'analyser leurs enchaînements. Il ne faut néanmoins pas oublier que ces méthodes ne sont pas complétement objectives car les équations utilisées peuvent embarquer un certain nombre d'a priori théoriques. Par exemple, les chaines de Markovs, que nous décrirons et utiliserons plus tard, reposent sur la recherche de motifs séquentiels (co-occurrence d'événements musicaux dans le temps) en fonction des événements précédents. Cette approche n'englobe pas nécessairement tout les facettes de la musique ; la musique atonale étant un très bon exemple de musique dont les structures ne se déploient pas nécessairement linéairement dans le temps. Néanmoins, le cadre théorique de ce modèle nous permet d'appréhender très précisément la question des attentes musicales, peu importe le style musical, ce qui en fait un outil d'une rare acuité pour notre contribution.

2 Modèles statistiques de la musique – Comment identifier des structures ?

Le modèle IDyOM (Pearce 2005) est actuellement le modèle statistique le plus largement utilisé dans la communauté des sciences cognitives de la musique, et constitue également la base du modèle que j'ai développé pour mes propres recherches (Marion *et alii* 2025). Basé sur les chaînes de Markov, il analyse les probabilités de transition entre les événements musicaux (hauteurs, rythmes, timbres, etc.). Prenons par exemple la mélodie bien connue *Au clair de la lune*. En observant sa structure, nous remarquons que la note *do* est suivie deux fois par *do*, une fois par *ré* et une fois par *mi* (voir Figure 1). Ainsi, la probabilité de transition de *do* à *do* est de ½, tandis qu'elle est de ¼ pour aller *ré* et *mi*. Cette approche permet de modéliser les structures musicales dites d'ordre 1, c'est-à-dire les transitions entre notes successives.

La musique repose pourtant sur des structures bien plus complexes que de simples transitions immédiates entre événements sonores et elle intègre des dépendances à long terme. Pour les analyser, une approche consiste à utiliser des chaînes de Markov d'ordres supérieurs : plutôt que de se limiter aux transitions entre notes consécutives, il s'agit d'examiner des relations entre séquences plus longues, par exemple le passage de *« do, do »* à *« ré, mi »* (modélisation d'ordre 2). Ce principe peut être généralisé à des ordres plus élevés (3, 4, voire plus), capturant ainsi des structures musicales plus riches et détaillées. L'idée centrale, illustrée ici par une courte séquence mélodique, est qu'en appliquant ce processus à de vastes corpus musicaux, il devient possible d'identifier les gestes idiomatiques propres à un style ou à une œuvre, tout en lissant les gestes anecdotiques moins significatifs. Cette approche met en lumière les schémas musicaux récurrents et distinctifs, contribuant ainsi à une compréhension plus fine des structures musicales complexes.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

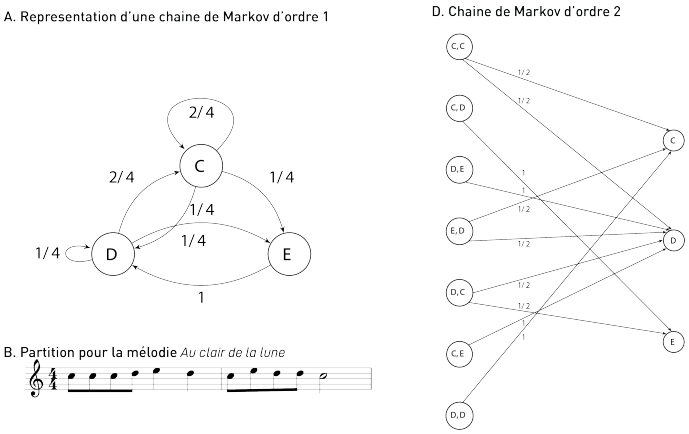


FIG. 2 : Représentation schématique d'une chaine de Markov d'ordre 1 (A) et d'ordre 2 (D) pour la mélodie Au clair de la lune.

3 Différentes musiques – Différentes structures

Les modèles statistiques sont entrainés (calcul des probabilités) sur un vaste ensemble de partitions musicales. L'analyse consiste ensuite à évaluer la probabilité attribuée par le modèle à chaque note d'une nouvelle partition. Pour effectuer cette évaluation, nous utilisons une mesure appelée *log-vraisemblance*, qui évalue le degré de *surprise* associé à chaque note. En d'autres termes, elle indique dans quelle mesure une note diffère des attentes du modèle. Pour illustrer ce concept, prenons l'exemple d'un choral de Bach où les valeurs de surprise sont calculées par un modèle entrainé sur les autres chorals de Bach (voir Figure 3). Ces valeurs de surprise fournissent une indication de la divergence entre les notes écrites sur la partition et les prédictions du modèle statistique, offrant ainsi un aperçu de la complexité et de l'imprévisibilité des motifs musicaux. Il est remarquable de constater la redécouverte de règles formelles similaires à celles observées dans les traités de contrepoint. Par exemple, le premier point du chapitre dédié aux règles mélodiques de l'ouvrage de Noël-Gallon et Marcel Bitsch préconise « l'usage maximal des mouvements conjoints, favorisant leur prolongation autant que possible ». Le second point souligne la nécessité d'éviter, autant que possible, « les mouvements disjoints, particulièrement en ce qui concerne les valeurs brèves » (Noël-Gallon/Bitsch 1964 : 18-19). L'observation des sommets du graphe de la surprise révèle effectivement des correspondances avec des mouvements disjoints.
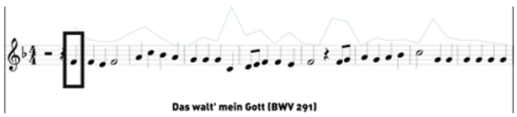


FIG. 3 : Choral de Bach (Das walt' mein Gott) avec le signal de surprise (au-dessus) calculé avec le modèle IDyOM.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

Pour approfondir cette analyse, explorons des règles plus complexes. Par exemple, en ce qui concerne les intervalles mélodiques, certaines règles régissent l'admissibilité de deux notes successives. On établit que les intervalles majeurs et mineurs ne doivent pas dépasser une sixte, et les intervalles diminués ou augmentés sont proscrits. En ajustant la partition pour inclure un *mi* afin de créer une quarte augmentée entre *si* et *mi* (Figure 4), nous observons un pic significatif dans la *surprise*. Une autre règle établit que lorsqu'une quarte augmentée est traversée en trois ou quatre notes, elle doit être précédée ou suivie d'un mouvement conjoint de même direction. En divisant l'intervalle de quarte augmentée en trois notes précédées d'un mouvement conjoint de direction opposée, nous observons un pic dans la 'surprise' en raison du mouvement disjoint. Toutefois, il est également notable que la 'surprise' augmente progressivement jusqu'au mi, ce qui indique un élément moins prévisible. Néanmoins, en remplaçant le mouvement disjoint par un mouvement conjoint de même direction, la 'surprise' diminue. Le modèle statistique utilisé avait été entrainé au contact des voix de soprano des chorals de Bach. Ces mélodies trouvent, pour la plupart, leur origine dans le *cantus firmus* luthérien, issu de la tradition liturgique. Ces mélodies préexistantes, héritées du répertoire ecclésiastique, devaient être fonctionnelles dans un contexte polyphonique strict et respectaient des principes de composition rigoureux, tant sur le plan mélodique que structurel. Bach, dans son travail d'harmonisation, s'inscrit dans une tradition où la mélodie principale suit les règles canoniques du contrepoint strict, telles que formalisées plus tard dans le Traité de contrepoint rigoureux de Marcel Bitsch et Jean Gallon. Ces exemples démontrent donc comment l'analyse statistique permet de reconnaître les règles déjà identifiées par une approche formelle et ainsi valider sa validité musicologique.

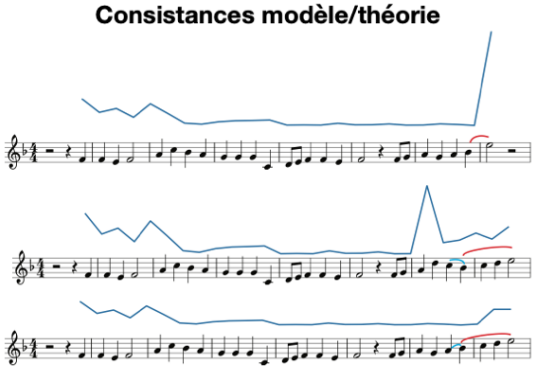


Fig. 4 : Signal de surprise calculé par le modèle IDyOM pour différentes mélodies modifiées. On retrouve les règles du Traité de contrepoint rigoureux de Marcel Bitsch. La quarte augmentée est interdite ; la quarte augmentée franchie en trois ou quatre notes doit être précédée par un mouvement conjoint de même direction.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

Ce qui rend ce modèle particulièrement intéressant, c'est sa capacité non seulement à extraire ces règles, mais aussi à s'adapter si facilement à différents corpus musicaux (Pearce 2018). Par exemple, dans une étude récente (Marion *et alii* 2025), le modèle a été entraîné sur un ensemble de musiques occidentales tonale ainsi que sur un corpus de musique chinoise traditionnelle modale originaire de la région du Shanxi. Lorsqu'ils sont appliqués à la même mélodie, ces deux modèles génèrent des niveaux de *surprise* très distincts. En représentant graphiquement la surprise moyenne pour chaque modèle, il devient évident que les mélodies occidentales et chinoises forment deux groupes distincts dans cet espace (voir Figure 5), indiquant une meilleure performance quand le modèle essaie de prédire le genre musical sur lequel il a été entrainé. Cela le rend ainsi capable de deviner le genre d'une mélodie inconnue, mais aussi de quantifier la ressemblance entre différents répertoires sous la forme d'une *distance culturelle* (Demorest/Morrison 2016). Cette mesure, quantifiable avec une grande précision, est très intéressante d'un point de vue musicologique car elle peut permettre de comparer des corpus et de mesurer leur évolution au cours du temps ou de l'espace en se débarrassant d'un nombre significatif de biais culturel dû à la culture de l'expérimentateur ou expérimentatrice.

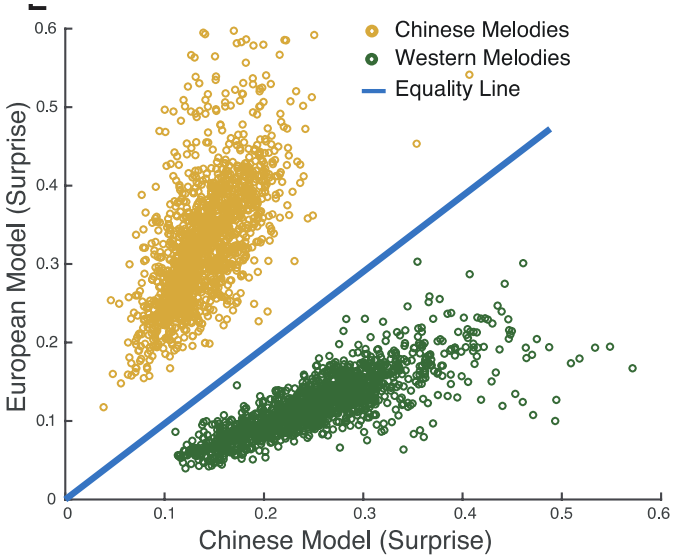


Fig. 5 : Chaque point représente une œuvre musicale. Les points jaunes représentent les œuvres chinoises traditionnelles de la région du Shanxi et les points verts les œuvres occidentales. L'axe x représente la surprise moyenne calculée par le modèle chinois, l'axe y représente la surprise moyenne calculée par le modèle occidental. Ainsi, si une œuvre tombe sur la ligne d'égalité cela veut dire qu'elle est autant surprenante pour le modèle chinois que pour le modèle occidental. Si elle tombe en dessous, elle est plus surprenante pour le modèle chinois, si elle tombe au-dessus, elle est plus surprenante pour le modèle occidental. On remarque clairement que les œuvres occidentales sont plus surprenantes pour le modèle chinois et inversement. Cela est une très bonne validation du modèle IDyOM, mais plus encore est une bonne façon d'évaluer dans quelle mesure deux corpus musicaux sont composés de structures musicales différentes.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

4 Prédire la musique – Joiks et Samis – Une affaire culturelle

Une étude ethnologique (Krumhansl/Toivanen *et alii* 1999), menée auprès des Samis, peuple autochtone du nord de la Suède, s'est intéressée à leurs chants traditionnels[3], les joiks, considérés comme l'une des plus anciennes traditions musicales d'Europe. Dû à l'apparition seulement récente de l'écriture dans la culture Sami, leur origine reste difficile à retracer. Le joik est une forme de chant profondément personnel et spirituel, souvent dédié à une personne, un animal ou un paysage, et visant à l'évoquer plutôt qu'à le décrire. Cette dimension est renforcée par le fait que le verbe correspondant est transitif : on *joike* quelqu'un ou quelque chose. Traditionnellement chanté a cappella, le joik repose souvent sur des échelles pentatoniques, mais laisse une grande liberté mélodique aux chanteurs. Bien qu'il ait été réprimé lors de la christianisation et des politiques d'assimilation, il a survécu et connaît aujourd'hui un renouveau. Sa pratique demeure ancrée dans un cadre intime et communautaire : certains joikeurs, comme la tradition le voulait, chantent entre eux, en cercle, plutôt que face à un public, même si certaines performances modernes adoptent un format plus scénique. Le joik agit comme un vecteur de lien entre l'individu, son environnement et sa communauté immédiate, témoignant d'une autre conception de la musique : non pas un spectacle, mais une présence, un acte d'évocation.

Le but de l'étude était de montrer que les structures de la musique Sami se reflétaient également dans leur perception. Pour se faire, les chercheurs ont transcrit plusieurs joiks en notation musicale occidentale et ont rencontré des musiciens Samis, Finlandais et du reste de l'Europe. Ils leur ont joué des fragments de mélodies et leur ont ensuite demandé de chanter la note finale (qui avait préalablement été retirée de l'enregistrement). Cette méthode est très efficace pour mesurer les attentes des auditeurs et auditrices, fournissant une mesure directe et objective des attentes individuelles.

Les résultats de cette expérience ont révélé que les participants Samis étaient plus précis pour prédire la note qui aurait dû être jouée, validant ainsi leur familiarité plus grande avec le corpus des Joiks pour les participants européens. De plus, cette analyse a aussi permis d'identifier la distribution statistique de ces prédictions en fonction de l'origine culturelle des participants (samie, finlandaise ou occidentale) et de montrer plus de similarité entre Samis et Finlandais qu'entre les Samis et les participants du reste de l'Europe. En conséquence, il apparaît que la manière dont nous anticipons les intervalles musicaux à venir dépende fortement de notre culture respective. Nos représentations internes de la musique varient donc en fonction de notre héritage culturel.

Il est également pertinent de mentionner une étude menée par les chercheurs Nori Jacoby et Josh H. McDermott. Les chercheurs ont exploré la perception du rythme au sein du peuple Tsimané, établi dans la région amazonienne de Bolivie. La musique traditionnelle tsimané, caractérisée par une structure monophonique, se distingue par l'absence de performances collectives : les musiciens jouent généralement en solitaire, sans coordination avec autrui. Cette singularité musicale, où la polyphonie et les ensembles sont inexistants, contraste avec de nombreuses traditions musicales mondiales. Ils ont soumis les participants à une expérience de reproduction rythmique, utilisant

[3] Vous pouvez en écouter un bref extrait ici : guimarion.github.io/ressources.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

une approche fondée sur la génération aléatoire de motifs rythmiques. Ces rythmes, puisque composés de 3 durées, peuvent être représentés sous forme de points dans un espace géométrique à 3 dimensions : un triangle, dont chaque côté symbolise une durée spécifique[4]. Au cours de l'expérience, les participants devaient reproduire un rythme après l'avoir écouté. Ce processus fut répété sur plusieurs itérations, chaque reproduction servant de base pour la génération du rythme suivant. Les résultats de cette expérimentation, illustrés dans la Figure 6, révèlent une convergence progressive des reproductions vers des régions spécifiques du triangle. Cette concentration géométrique traduit l'émergence de *biais perceptifs*, témoignant de la manière dont les participants organisent et interprètent intuitivement la structure temporelle des motifs sonores.

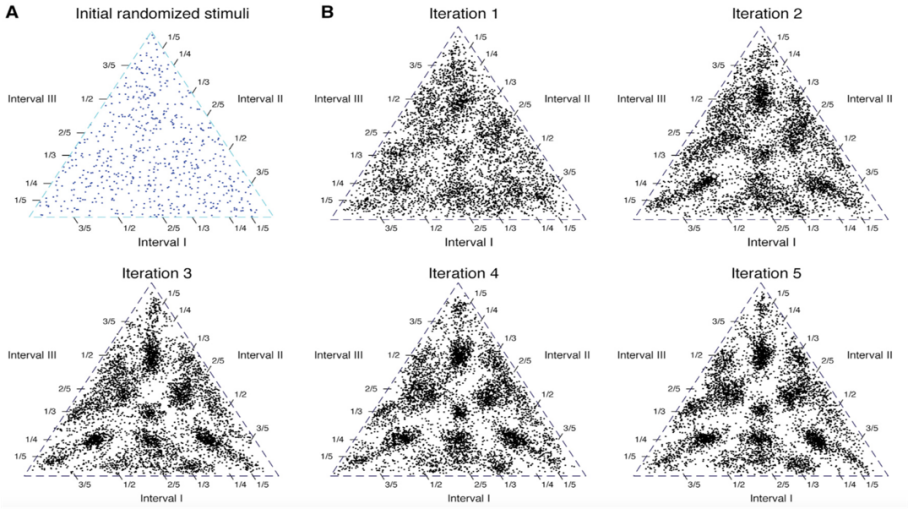


Fig. 6 : Quand les participants occidentaux reproduisent des rythmes tirés au hasard dans le triangle et que l'on reproduit l'opération, on remarque que les rythmes convergent vers des zones spécifiques du triangle. Ces zones représentent les rythmes qui sont les mieux encodés par les auditeurs et auditrices. Figure adaptée à partir de Jacoby/McDermott 2017.

[4] Cet espace est en fait de 2 dimensions (à plat). L'astuce repose sur le fait que la durée totale des rythmes est constance (2 secondes), la troisième durée est donc toujours égale à *2 − d1 -d2*.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

Comparer les schémas rythmiques privilégiés par les Tsimanés, des étudiants américains, non-musiciens et musiciens, interroge la part d'universel et de culturel dans la perception musicale (voir Figure 7). Ces schémas sont identiques chez les participants américain (musiciens ou non) mais très différents pour les Tsimané.

Ces résultats montrent que la perception du rythme dépend étroitement du contexte culturel, indépendamment de l'expertise musicale ou de la pratique instrumentale. Elle démontre aussi que la perception rythmique ne résulte pas uniquement de mécanismes cognitifs universels, mais émerge principalement de la transmission culturelle au travers de l'exposition passive. Ainsi, l'interaction entre cognition, expérience et héritage culturel apparaît comme un levier central dans la construction de notre sensibilité musicale.

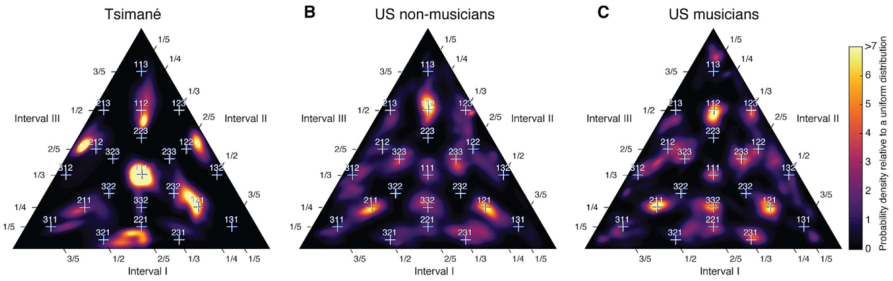


FIG. 7 : La même expérience a été réalisée avec des Tsimané et des participants américains (musiciens ou non). On remarque que la pratique musicale n'a pas d'impact sur la distribution dans le triangle. Par contre, les américains et les Tsimanés montrent des distributions très différentes. Figure adaptée à partir de Jacobi et McDermott 2017.

5 Prédire la musique – Codage prédictif et neurosciences

Les Tsimané, les Samis et les auditeurs et auditrices occidentaux prédisent donc tous la musique, mais différemment. La théorie du codage prédictif offre un bon cadre explicatif à ce phénomène (Clark 2013). Selon cette théorie, le cerveau humain cherche constamment à anticiper les stimuli sensoriels et à minimiser l'activité cérébrale associée. Ainsi, un stimulus bien prédit entraînera une réduction significative de l'activité cérébrale, tandis qu'un stimulus mal prédit maintiendra son niveau d'activité maximal, le rendant plus saillant par rapport aux autres stimuli. Appliquée à la musique, cette théorie suggère que le cerveau tente en permanence de prédire le prochain événement musical. Dans le cas de mélodies, les notes les moins probables susciteraient une forte activité cérébrale, tandis que les notes très probables en engendreraient moins.

Les *violations musicales* sont souvent utilisées pour étudier de tels mécanismes. Les chercheurs et chercheuses modifient intentionnellement une note ou un accord pour enfreindre une règle formelle de la théorie musicale, isolant ainsi les réponses neuronales associées à ces événements musicaux imprévisibles (Lee/Jung/Loui 2019) et montrant que les événements anormaux engendrent des réponses neuronales de plus grande amplitude. Ces réponses neuronales sont enregistrées à l'aide de l'électroencéphalographie (EEG). Ce dispositif, composé de 64 électrodes placées sur le cuir

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

chevelu, permet de capturer l'activité électrique du cerveau au travers du crane. Une plus grande amplitude de ces mesures pour une électrode donnée indique une plus forte activité dans les structures cérébrales sous-jacentes.

Les modèles statistiques de la musique, comme le modèle IDyOM mentionné précédemment, sont utilisés pour mesurer la probabilité des événement musicaux. Plutôt que de comparer des événements musicaux 'naturels' à des événements 'modifiés', ces modèles permettent d'analyser chaque événement au sein d'une mélodie réelle et de comparer l'amplitude de l'activité cérébrale avec la probabilité de chaque note (Di Liberto *et alii* 2020). En isolant la réponse cérébrale pour chaque note, il est possible de mesurer leurs amplitudes. En examinant la corrélation entre le degré de surprise associé à chaque note (mesuré comme la log vraisemblance[5], inversement reliée à la probabilité) et l'amplitude de la réponse cérébrale associée, on observe une relation très nette, avec une corrélation de 0.8 (Marion *et alii* 2021), présentée Figure 8). Cela suggère un lien très fort entre le degré de prédictibilité d'une note dans une mélodie et l'activité cérébrale qu'elle suscite.

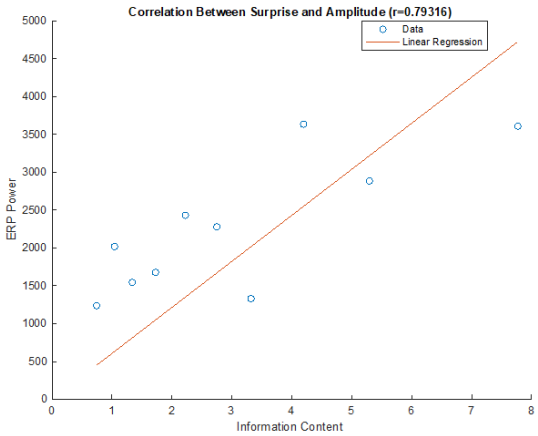


Fig. 8 : Corrélation entre l'amplitude de chaque note et la surprise calculée par le modèle. On remarque une très forte corrélation linéaire de 0.8. Les notes d'une mélodie ont été groupées en 10 groups selon leur degré de surprise mesuré avec la log-vraisemblance inversée. Pour chaque groupe, l'amplitude moyenne des réponses neuronales a été calculée. Nous présentons ici la relation entre la log-vraisemblance inversée de chaque événement (axe x) avec l'amplitude de la réponse neuronale (axe y). Données issues de Marion *et alii* 2021, analysées de la sorte pour l'occasion.

[5] Appelé en anglais Information Content (IC), elle est définit comme $IC = -lg(p)$ avec p la probabilité de l'événement musical.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

Les moments de silence inattendus offrent une opportunité unique de mettre en évidence ces prédictions cérébrales : lors de ces moments, le cerveau émet une prédiction alors qu'aucune entrée sensorielle n'est présente. Pour explorer cette dynamique, nous avons utilisé notre modèle statistique de la musique pour calculer la probabilité d'entendre une note durant chaque silence présent dans les chorals de Bach. Nous avons examiné les réponses cérébrales pendant ces moments de silences inattendus (Di Liberto *et alii* 2021). Premièrement, nous avons constaté que l'activité cérébrale associée aux silences ressemble étonnamment à celle associée aux notes, mais avec une inversion de polarité (la réponse aux notes est positive et la réponse aux silences est négative). Ainsi, lorsque ces deux types de réponses se produisent simultanément dans le cerveau, elles tendent à s'annuler, la prédiction réduisant ainsi la réponse sensorielle.

Nous avons aussi observé une corrélation significative entre l'amplitude des réponses aux silences et la probabilité d'entendre une note à la place de ces silences. Cette corrélation suggère que le cerveau émet effectivement des prédictions lors de l'écoute musicale, et plus un événement est prédictible, plus la réponse neuronale associée est intense. Par conséquent, des prédictions justes réduisent au maximum la réponse sensorielle, conduisant à une réponse neuronale plus faible. Ces résultats fournissent une preuve supplémentaire que le cerveau humain utilise des mécanismes de prédiction pour traiter et anticiper les événements musicaux. Ils montrent également que la réduction d'amplitude des réponses cérébrales est étroitement liée à la prévisibilité des événements musicaux, renforçant ainsi la théorie du codage prédictif dans le traitement de la musique par le cerveau.

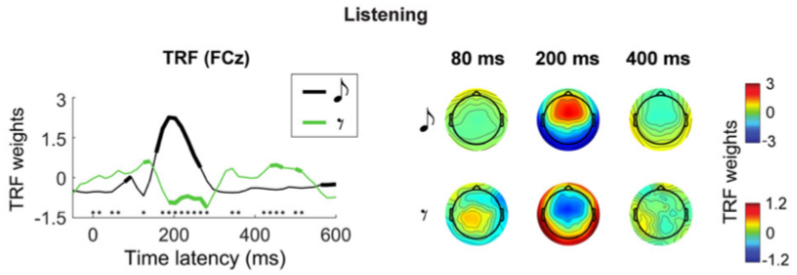


Fig. 9 : Les réponses aux notes et aux silences inattendus (à gauche) sont inversement reliées. Les zones du cerveau liées à ces réponses (droite) sont aussi inversement reliées. Cela est un argument fort pour la nature prédictive des réponses durant les silences et de leur fonction inhibitrice.

6 Apprécier la musique – Émotions musicales et prédictions

Les travaux initiaux de Leonard B. Meyer (1956) ont jeté les bases de la relation entre les émotions musicales et les attentes dans la musique. Depuis lors, un vaste ensemble d'études en psychologie expérimentale a cherché à explorer cette relation plus en profondeur. Dans cette discipline, les émotions primaires sont souvent catégorisées selon deux axes principaux : l'activation psychologique, qui représente l'intensité émotionnelle (allant de l'ennui à l'excitation), et la valence, qui définit si l'émotion est perçue

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

comme positive ou négative (comme la tristesse par opposition à la joie). La notation de ces deux dimensions permet donc d'avoir une estimation de l'état émotionnel engendré par une pièce spécifique. Avec l'aide des modèles statistiques précédemment décrits, il a été possible de prédire les réactions émotionnelles des individus en lien avec les ruptures d'attentes musicales. Ainsi, une corrélation a été établie entre les émotions ressenties par les auditeurs et auditrices et les moments où la musique brise leurs attentes préétablies (Sauvé *et alii* 2028 ; Pearce 2018). Précisément, les événements surprenants étaient associés à plus d'activation psychologique et moins de valence, en particulier quand le motif surprenant était rythmique.

Une autre étude, répliquée de nombreuses fois dans les vingt dernières années, a porté sur le plaisir musical, démontrant que les événements musicaux présentant trop de surprise ou pas assez suscitent généralement que peu de plaisir chez les auditeurs et auditrices (Gold *et alii* 2019). Au contraire, ce sont les événements musicaux présentant un niveau intermédiaire de surprise qui ont la capacité de générer le plaisir maximal. Des études en neurosciences ont corroboré ces résultats en montrant que les zones du cerveau associées à la sensation de plaisir, telles que les aires dopaminergiques, sont activées en fonction du degré de surprise induit par les structures musicales entendues (Cheung *et alii* 2019). Ces recherches suggèrent que les émotions procurées par la musique sont étroitement liées aux attentes et aux ruptures d'attentes musicales. Un équilibre subtil entre la prédictibilité et la surprise semble être crucial pour susciter des émotions positives et un plaisir musical optimal.

7 Apprendre à aimer – Enculturation musicale

Si les prédictions musicales reflètent la culture des auditeurs et auditrices et que ces prédictions conditionnent leurs émotions, nous comprenons désormais un mécanisme à l'origine de la variabilité inter-individuelle de la perception musicale. Qu'en est-il de l'apprentissage de ce modèle de prédiction ? Comment les structures de notre environnement musical de retrouvent dans notre cerveau ?

Une étude européenne a abordé cette question à travers le rythme (Hannon/Trehub 2005). Elle examine les différences entre les rythmes en métrique 4/4, très utilisés en occidents, et les rythmes en métrique 7/8, plus courants dans les musiques des Balkans et d'Europe de l'Est. Les chercheurs ont étudié les altérations rythmiques, telles que l'ajout ou la suppression d'un temps dans une mesure donnée. Les participants, tous originaires de cultures occidentales, devaient détecter ces altérations rythmiques. Ils ont réussi à repérer les modifications dans les rythmes en 4/4, mais pas dans ceux en 7/8. Cependant, après une période d'une semaine pendant laquelle les participants ont écouté chaque jour pendant une heure des musiques traditionnelles turques en métrique 7/8, ils ont finalement été en mesure de détecter les altérations dans les rythmes en 7/8, même si leur performance était moins précise que pour les rythmes en 4/4. Cette expérience a été reproduite avec des nouveau-nés. Plutôt que de demander aux bébés de détecter ces altérations, les chercheurs ont mesuré le temps durant lequel les nourrissons fixaient l'enceinte pour les événements rythmiques altérés par rapport aux événements non-altérés. Les résultats ont montré que les bébés de 6 mois ne présentaient pas de différences de perception entre les rythmes alternés et non

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

altérés, qu'ils soient en 4/4 et en 7/8. En revanche, chez les bébés de 12 mois, des observations similaires à celles des adultes ont été constatées. De plus, chez ces bébés de 12 mois, la différence dans la perception des événements modifiés par rapport aux non-modifiés pour les rythmes en 7/8, après exposition, ressemblait à celle observée pour les rythmes en 4/4 avant l'exposition. Ces résultats suggèrent que les nouveaunés disposent potentiellement d'une capacité d'apprentissage supérieure à celle des adultes et que l'aptitude à détecter les structures rythmiques est influencée par une exposition passive à la musique.

J'ai eu l'opportunité de mener moi-même une étude sur les structures neuronales impliquées dans l'apprentissage des prédictions musicales et leur influence sur le plaisir esthétique. Cette recherche s'est appuyée sur un échantillon occidental d'auditeurs et auditrices, basés à Paris. Les réactions cérébrales des participants ont été enregistrées pendant l'écoute de morceaux de musique chinoise de la région du Shanxi. Les sessions d'enregistrement ont eu lieux avant et après une période d'exposition à domicile de 2 semaines *via* une plateforme de streaming conçue pour l'étude. Deux groupes distincts ont été formés : l'un exposé exclusivement à la musique du Shanxi, l'autre servant de groupe témoin, exposé à des chorals de Bach, supposés ne pas induire d'apprentissage spécifique à la musique du Shanxi. Toutes les pièces ont été jouées au Guzheng, instrument traditionnel chinois, garantissant que seules les structures musicales différaient entre les deux corpus. Les participants exposés à la musique du Shanxi ont développé une préférence plus marquée pour les morceaux du même genre après la phase d'exposition, contrairement au groupe témoin. L'analyse des réponses corticales à des stimuli musicaux révèle une constance dans la réponse initiale du cortex auditif primaire à 80 millisecondes, mais une altération notable à 200 millisecondes, marquée par une diminution de l'amplitude moyenne des réponses chez les participants ayant développé un apprentissage spécifique. Ces réponses corticales sont connues pour encoder le signal de surprise sous forme d'une erreur de prédiction. Cette observation souligne donc un apprentissage passif spécifique aux attentes musicales. De plus, alors que des études antérieures modifiaient les stimuli pour analyser les variations de plaisir musical, notre méthodologie a maintenu les mêmes œuvres, se concentrant sur les changements de réponses cérébrales liés aux attentes des auditeurs et auditrices, permettant de montrer avec précision le lien entre le contexte culturel, les prédictions musicales et le plaisir esthétique.

Dans une étude parallèle impliquant des furets, nous avons observé des réponses cérébrales distinctes lors de l'écoute de chorals de Bach (en substitution à la musique chinoise). Les furets exposés à la musique de Bach ont présenté une diminution de la réponse aux stimuli musicaux surprenants, suggérant ainsi une possible similarité des mécanismes d'apprentissage entre différentes espèces. Cette découverte appuie la perspective selon laquelle les mécanismes de prédiction, contribuant au contrôle des événements inattendus, pourraient offrir un avantage évolutif partagé. Cependant, des investigations supplémentaires sont nécessaires pour examiner les liens entre ces mécanismes de prédiction et le système de récompense chez les furets, dans le but de mieux appréhender les aspects spécifiquement humains de la relation avec la musique.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

8 Conclusions, discussions et réflexions futures

Ma contribution met en lumière l'importance des prédictions musicales dans notre rapport à la musique, prolongeant les travaux de Leonard B. Meyer. Ce jeu subtil d'attentes et de surprises semble s'enraciner dans une architecture cérébrale que nous partageons avec d'autres espèces, suggérant un héritage évolutif : anticiper les sons aurait pu constituer un atout vital, comme pour déceler un danger imminent.

Le cerveau humain, à travers une imprégnation passive et continue, absorbe les structures musicales de son environnement, les encode sous forme de régularités statistiques et les mobilise pour émettre des attentes pendant l'écoute musicale. L'erreur de prédiction ainsi calculée, lorsque la musique déjoue ou confirme ces attentes, devient le moteur même de notre plaisir, modulé par la dopamine. Ainsi, la culture musicale peut être redéfinit sous un prisme cognitif : l'ensemble des structures musicales partagées par un groupe social qui façonne la façon dont notre cerveau prédit et conditionne notre perception et appréciation.

Cette perspective n'a pas la prétention de révéler des dynamiques inédites mais vise à offrir un cadre explicatif aux dynamiques sociologiques déjà bien étudiées. L'analyse de Pierre Bourdieu dans *La Distinction : Critique sociale du jugement* (1979) illustrait déjà parfaitement cette idée. Nous en faisons une relecture en montrant que l'appartenance sociale, par le prisme de l'exposition musicale, façonne nos cadres perceptifs dès l'enfance.

Une extension de cette idée est l'observation bien connue que les auditeurs et auditrices ont tendance à réécouter les titres de leur adolescence tout au long de leur vie (Hemming 2023) et cela résonne avec la plus grande plasticité observée dans le cortex auditif pendant l'adolescence (Occeli/Edeline 2017). Cette dernière pourrait être ainsi responsables d'une plus grande malléabilité et cristallisation de la formation des prédictions musicales. Les pistes futures de mes recherches se situent ici : à l'intersection entre sciences cognitives et sociologie. Si la prédiction musicale façonne nos goûts, qu'en est-il des autres forces qui les orientent ? Comment les traits de personnalité (Schäfer/Mehlhorn 2017), les mécanismes d'identification (Mellander *et alii* 2018), ou les injonctions sociales (Inglefield 1972) participent-ils à ce tissage complexe ? Explorer les arcanes cérébraux de ces influences représente un défi stimulant, où dialoguent anthropologie et neurobiologie, car, comprendre comment la société interagit avec notre physiologie pour faire émerger notre perception du monde ne serait-il pas un pas en avant pour toucher notre humanité ?

Je tiens à exprimer ma gratitude aux organisatrices Ester Pineda et Marta Grabocz pour cette opportunité d'échanges passionnants, ainsi qu'à mes institutions, collaborateurs et l'ensemble des participants et participantes pour leurs contributions plus qu'enrichissantes[6].

[6] Réponse à l'expérience du début : Round 1 : Corelli – Mozart | Round 2 : Mozart – Corelli.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

Bibliographie

Aidi, Hisham (2023), « Gnawa Mirror : Race, Music, and the 'Imperialism of Categories' », *International Journal of Middle East Studies*, p. 1-22.

Bourdieu, Pierre (1979), *La distinction : Critique sociale du jugement*, Paris Les Éditions de Minuit.

Cheung, Vincent K.M. et alii (2019), « Uncertainty and Surprise Jointly Predict Musical Pleasure and Amygdala, Hippocampus, and Auditory Cortex Activity », Current Biology 29.23, p. 4084-4092.e4 (DOI 10.1016/j.cub.2019.09.067).

Clark, Andy (2013), « Whatever next ? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science », *Behavioral and brain sciences* 36.3, p. 181-204.

Demorest, Steven M. ; Morrison, Steven (2016), « Quantifying culture : The cultural distance hypothesis of melodic Expectancy », in : Chiao, Joan Y. ; Li, Shu-Chen ; Seligman, Rebecca ; Turner, Robert (éd.), *The Oxford handbook of cultural neuroscience*, p. 198-205.

Di Liberto, Giovanni M. *et alii* (2020), « Cortical encoding of melodic expectations in human temporal cortex » *eLife* 9, e51784 (DOI 10.7554/eLife.51784).

Di Liberto, Giovanni M. ; Marion, Guilhem ; Shamma, Shihab A. (2021), « The music of silence. Part II : Music Listening Induces Imagery Responses », *Journal of Neuroscience* 41 :35, p. 7449-7460 (DOI 10.1523/JNEUROSCI.0184-21.2021).

Gold, Benjamin P. *et alii* (2019), « Predictability and Uncertainty in the Pleasure of Music : A Reward for Learning ? », *Journal of Neuroscience* 39.47, p. 9397-9409 (DOI 10.1523/JNEUROSCI.0428-19.2019 ; en ligne : https://www.jneurosci.org/ content/39/47/9397.full.pdf).

Hannon, Erin E. ; Trehub, Sandra E. (2005), « Tuning in to musical rhythms : Infants learn more readily than adults », *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102.35, p. 12639-12643 (DOI 10.1073/pnas.0504254102).

Hemming, Jan (2013), « Is there a peak in popular music preference at a certain song-specific age ? A replication of Holbrook & Schindler's 1989 study », *Musicae Scientiae* 17/3 (DOI 10.1177/1029864913493800).

Inglefield, Howard G. (1972), « Conformity behavior reflected in the musical preference of adolescents », *Contributions to Music Education* 1, automne, p. 56-67.

Jacoby, Nori ; McDermott, Josh H. (2017), « Integer Ratio Priors on Musical Rhythm Revealed Cross-culturally by Iterated Reproduction », Current Biology 27/3 6 février, p. 359-370 (DOI 10.1016/j.cub.2016.12.031 ; PMID 28065607).

Krumhansl, Carol ; Toivanen, Pekka *et alii* (2000), « Cross-cultural music cognition : Cognitive methodology applied to North Sami yoiks », *Cognition* 76, p. 13–58 (DOI : 10.1016/S0010-0277(00)00068-8).

Lee, Daniel ; Jung, Harim ; Loui, Psyche (2019), « Attention Modulates Electrophysiological Responses to Simultaneous Music and Language Syntax Processing », *Brain Sciences* 9, novembre, p. 305 (DOI : 10.3390/brainsci9110305).

Marion, Guilhem *et alii* (2025), « IDyOMpy : A new Python-based model for the statistical analysis of musical expectations », *Journal of Neuroscience Methods* 415, mars, 110347 (DOI 10.1016/j.jneumeth.2024.110347).

Mellander, Charlotta *et alii* (2018), « The geography of music preferences », *Journal of Cultural Economics* 42/2 (DOI 10.1007/s10824-018-9320-X).

Meyer, Leonard B. (1956), *Emotion and meaning in music*, Chicago, University of Chicago Press.

Nattiez, Jean-Jacques (1987), *Musicologie générale et sémiologie*, Paris, C. Bourgeois.

Noël-Gallon ; Bitsch, Marcel (1964), *Traité de contrepoint*, Paris, Durand.

Occeli, Florian ; Edeline, Jean-Marc (2017), « Plasticité développementale dans le cortex auditif : La résultante de l'état de maturation cortical et des caractéristiques sonores de l'environnement », *Enfance* n° 3, p. 329-348.

Pearce, Marcus T. (2005), *The construction and evaluation of statistical models of melodic structure in music perception and composition*, PhD thesis, Londres, City University London, p. 373-404.

Pearce, Marcus T (2018), « Statistical learning and probabilistic prediction in music cognition : mechanisms of stylistic enculturation », *Annals of the New York Academy of Sciences* 1423.1, p. 378-395.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

Sauvé, Sarah *et alii* (Aug. 2018). « Effects of pitch and timing expectancy on musical emotion », *Psychomusicology : Music, Mind, and Brain* 28 (DOI 10.1037/pmu0000203).

Schäfer, Thomas ; Mehlhorn, Claudia (2017), « Can personality traits predict musical style preferences ? A meta-analysis », *Personality and Individual Differences* 116, octobre, p. 265-273 (DOI : 10.1016/j.paid.2017.04.061).

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748