

Vers une musicologie cognitive : une approche inter-individuelle de la perception du beau

Guilhem Marion
Supervisé par Shihab Shamma
Laboratoire des Systèmes Perceptifs, ENS

Introduction

Pour Platon, le beau n'est pas une valeur de l'objet mais une valeur morale de l'âme. Si la question de la posture du récepteur est, en effet, primordiale, il paraît hâtif de penser que la beauté est indépendante des propriétés physiques. Ce sentiment n'est en effet généré qu'en présence de certains effets esthétiques. Nous proposons ici que le beau est accédé par le biais de certaines propriétés particulières des objets esthétiques. Or, Hume pense que « La beauté n'est pas une qualité inhérente aux choses elles-mêmes, elle existe seulement dans l'esprit qui la contemple, et chaque esprit perçoit une beauté différente », suggérant alors le caractère subjectifs de l'accès à la beauté. Néanmoins, comme Kant qui pense que « le beau est ce qui plaît universellement sans concept », Hume introduit par ailleurs l'idée d'une certaine universalité des mécanismes d'accès au beau. Qu'est-ce que les sciences de la perception peuvent dire des mécanismes d'accès au beau et de leur universalité ?

De nombreuses études ont pu montrer que les mécanismes de perception du monde étaient éminemment subjectifs (pensons à l'extrait audio Laurel/Yanny, [lien](#), très prisé des interautes). En effet, un même stimulus peut engendrer différents signaux cérébraux dans les aires perceptives. Néanmoins, les mécanismes engendrant le sentiment de beau depuis ces signatures cérébrales restent inconnus. Nous hypothétisons que les mécanismes de perception du monde extérieur sont subjectifs mais qu'il pourrait exister des mécanismes généralement partagés entre les individus quant à l'accès au beau depuis ces signatures cérébrales issues de la perception. En effet, ces mécanismes d'accès à la beauté, étant plus généraux, auraient pu être construits évolutivement très tôt dans l'histoire de l'espèce humaine et expliqueraient que des individus partageant une même culture pourrait avoir une idée similaire du beau.

La musique est un exemple très intéressant d'un phénomène esthétique pouvant générer le sentiment de beauté. De plus, la musique possède un degré d'abstraction qui nous permet de la représenter aisément et de façon simple (la partition), contrairement à la peinture, par exemple. Penser la musique par son rapport écrit nous permet d'en dégager des mécanismes fondamentaux, nous pouvons par exemple voir la mu-

sique comme un langage et en extraire des structures grammaticales. De récentes études ont montré que des modèles statistiques [1] de la musique entraînés sur un grand nombre de partitions pouvaient décrire de façon fiable le traitement cérébral des attentes mélodiques. Ces derniers sont utilisés pour montrer que le signal de rupture d'attente, évaluant pour chaque note son caractère improbable, est représenté dans le cortex auditif lors de l'écoute de musique [2].

Il a été démontré que des émotions musicales reposent sur ces signaux d'attente [3] [4] que des modèles peuvent estimer. Ces mécanismes d'attente ont déjà été plus qu'étudiés par les musicologues, et de fortes similarités avec les modèles ont déjà été démontrées [5]. Les compositeurs, eux aussi, maîtrisent très bien ces mécanismes et les utilisent pour donner du sens à leurs compositions. D'autres études suggèrent que les mécanismes cérébraux à l'origine de ces signaux seraient probablement subjectifs [6] [7] [8].

Notre étude tentera alors de comprendre si ces signaux de rupture d'attente musicale sont liés au sentiment de beau. Puis, nous tenterons de comprendre si les mécanismes d'accès au sentiment de beau depuis les signaux cérébraux de rupture d'attente sont partagés entre des auditeurs de différentes cultures et pays. Cette étude permettra de comprendre les mécanismes d'accès au beau et aussi de mieux replacer la question de l'universalité dans ces mécanismes.

Nous considérerons cette question aux travers de plusieurs expériences cognitives à l'aide de modèles mathématiques de l'attente musicale de chaque participant. Nous pourrons ainsi mieux comprendre comment les mécanismes internes d'attente musicale façonnent la façon dont émane la notion de beauté. Une première expérience traitera de l'effet de l'exposition à une musique non-familière sur les mécanismes d'attente musicale afin de comprendre le processus d'apprentissage de ces modèles internes. Ensuite, une expérience permettant d'estimer le modèle interne des auditeurs sera conduite à travers plusieurs pays afin de comprendre la variabilité culturelle de ces mécanismes et ainsi d'esquisser une cartographie culturelle de la musique. Enfin, nous tenterons de comprendre le lien, déjà suggéré dans la littérature, entre mécanismes d'attente musicale et sentiment de beauté. Ce projet se positionne dans la

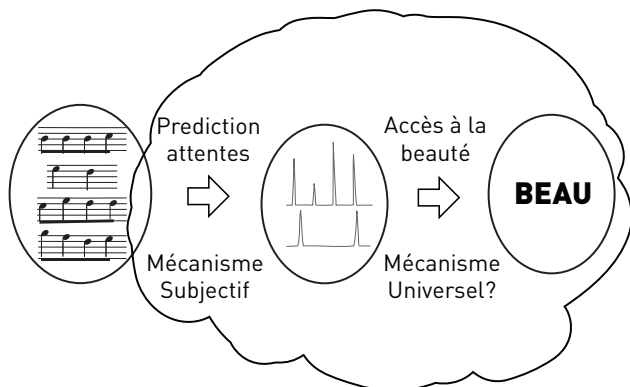


FIGURE 1 – Illustration de l’hypothèse de notre projet. Le sentiment de beauté pourrait être engendré par deux mécanismes cérébraux successifs, le premier étant subjectif produirait l’attente de chaque note et le second générant le sentiment de beauté à partir des signaux de rupture d’attente serait probablement partagés par un grand nombre d’individus.

lignée de la recherche étudiant comment les ruptures d’attente musicale sont utilisées par le cerveau pour générer des émotions et ouvrira la porte à une possible musicologie cognitive de la perception reposant sur les rapports culturels que les auditeurs entretiennent avec la musique.

Un projet artistique sera mené en parallèle des travaux scientifiques et se nourrira directement des résultats expérimentaux obtenus. Nous utiliserons les modèles d’attente musicale estimés pour différents individus afin de générer des mélodies différentes mais susceptibles de générer un sentiment de beau musical similaire chez différents participants. Cela donnera l’occasion aux auditeurs d’apprécier l’articulation entre un système de perception des attentes musicales subjectif et l’universalité du sentiment de beau qui en découle. Cette démarche se pose en distanciation des démarches usuelles en création assistée par ordinateur qui généralement utilisent des bases de données massives pour estimer une sensibilité moyenne. Notre projet, quant à lui, a cœur d’investir la question de la subjectivité inter-individuelle.

État de l’art

Perception, cognition et musique

Jean-Jacques Nattiez, dans sa sémiologie de la musique [9], appréhende la musique comme un langage utilisant ses propres systèmes internes de fonctionnement, de syntaxe et de production de sens. Nous faisons référence à la grammaire pour parler de la syntaxe d’un langage musical. C’est-à-dire ce qui fait son unicité, et qui, par conséquent, fait que nous puissions différencier une pièce de Mozart d’une pièce de Miles Davis. Mais

qu’en est-il de la signification, cette épineuse question pour laquelle J.J Nattiez a eu recours à la tripartition sémiologique.

Tripartition de Molino ou comment appréhender l’objet musical

Selon la tripartition sémiologique, un message n’est pas signifiant en soi, il peut néanmoins engendrer du sens chez son récepteur, ce sens n’est donc pas une information véhiculée par le message. Il est plutôt issu d’un processus de signification de la part du récepteur, lors duquel il met en relation le message avec son vécu (son *horizon*). La volonté signifiante de l’émetteur définit le processus opposé. Ces deux mécanismes de signification reposent sur le *sémiosis* (processus de signification associé à un signe). On appellera donc le processus de signification qui a lieu chez le récepteur *sémiosis esthétique* et le processus de signification issu de la volonté signifiante de l’émetteur *sémiosis poétique*.

Jean-Jacques Nattiez utilise cette idée dans sa sémiologie de la musique, le message devient l’oeuvre musicale dans sa condition physique (partition, enregistrement, performance, ...), l’émetteur le compositeur et le récepteur l’auditeur.

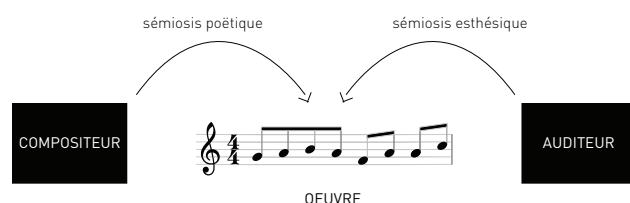


FIGURE 2 – Illustration de la tripartition sémiologique en musique.

De la même manière que Hegel exclut de son esthétique le beau de la nature parce qu’il n’est pas le fruit d’une spiritualité humaine, Nattiez considère que l’oeuvre dans sa condition physique (le niveau neutre de la tripartition sémiologique) ne véhicule aucun sens en soi. Sans spectateurs ni créateurs, il n’y a pas d’oeuvre. De ce fait, pour étudier la musique, le musicologue doit s’intéresser aux processus de signification.

Selon Ferdinand de Saussure [10], le *sémiosis* fait correspondre une image acoustique (le signifiant) à un concept (le signifié). Suivant cette idée, le *sémiosis esthétique* dans notre contexte musical est un mécanisme cérébral de signification permettant d’associer une stimulation acoustique à une activité cérébrale engendrant une émotion particulière.

La question de la subjectivité de la perception laisse entendre que chaque auditeur possède un *sémiosis esthétique* qui lui est propre, acquis lors d’une vie entière d’intérêt et d’exposition musicale. C’est précisément ce mécanisme que nous nous efforcerons de comprendre.

Langages musicaux et modélisation

Pour parvenir à nos fins, les sciences de la cognition ne suffiront pas. Afin d'appréhender le langage musical nous devons manipuler la notion de langage, et même en avoir un modèle. Une branche de l'informatique appelée *traitement naturel de la langue* a pour mission de comprendre le langage par le biais des règles structurant un discours et de les inférer à partir de données. C'est pourquoi nous nous appuyons sur ces méthodes issues de l'informatique, très en lien avec les mathématiques.

Les modélisations statistiques de la musique reposent sur l'observation de contenus musicaux. Généralement, cette étude se fait en estimant la probabilité d'apparition d'une note en fonction d'un contexte donné. Le modèle que nous utiliserons s'appuie sur des *chaînes de Markov* à ordres multiples. Une chaîne de Markov permet de simuler un processus sans mémoire (l'événement au temps t ne dépend que de l'événement au temps $t - 1$) en calculant les probabilités empiriques propres à un jeu de données. La figure suivante (fig. 4) présente un exemple de modélisation des hauteurs sur une mélodie simple où les noeuds sont les états (contexte) et les flèches sont les probabilités de transition entre états.



FIGURE 3 – Début de *Au Clair de la Lune*.

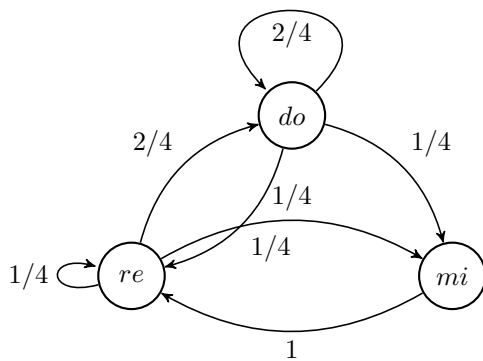


FIGURE 4 – Exemple de chaîne de Markov du premier ordre, elle représente les hauteurs de la mélodie *Au Clair de la Lune*, les flèches représentent les probabilités de transition. Les gestes idiomatiques sont capturés : *mi* se résout toujours par *re* et *do* est la note la plus stable. Effectuer le même calcul sur un grand corpus conduit à éliminer les gestes anecdotiques.

Cependant, la musique n'est pas un processus sans mémoire. Afin de pallier à cette lacune du modèle nous ne calculons pas les probabilités entre les notes, mais entre les $n - \text{grammes}$ qui sont des agrégats de n notes

afin de combiner de l'information à différentes échelles de temps. Par exemple, les séquences (do, re) , (mi, do) et (fa, sol) sont des exemples de 2-grammes. Comme le suggèrent certaines études [1] nous divisons la note entre sa hauteur et sa durée au sein de deux modèles indépendants. Cette technique nous permet de construire un modèle unifiant les deux paramètres principaux de la musique (hauteurs, durées) tout en conservant des dépendances à long terme.

IDyOM, modèle de l'attente musicale

IDyOM est un outil statistique utilisé pour modéliser les attentes mélodiques à l'échelle de la note [1], il repose sur les chaînes de Markov à ordres variables que nous avons définies précédemment. Il est composé de deux parties : un modèle à long terme (LTM) qui est pré-entraîné sur un corpus musical, et un modèle à court terme (STM) entraîné sur la pièce courante et utilisé pour saisir les structures répétitives lors de l'écoute. Une fois combinés, ces deux modèles permettent d'avoir une distribution de probabilité de la prochaine note à partir d'une séquence de notes passées (contexte). Ainsi, nous pouvons utiliser notre programme sur une partition quelconque et calculer la vraisemblance de chaque note (sa probabilité). La théorie de l'information, branche de l'informatique théorique, définit la rupture d'attente (*information content*) d'un événement par $-\lg(p)$ avec p la probabilité d'observation de cet événement. Nous pouvons donc, à partir d'une partition quelconque, calculer l'attente de chaque note, et ainsi tracer la rupture de l'attente au cours du temps pour cette partition, comme présenté en fig.5.

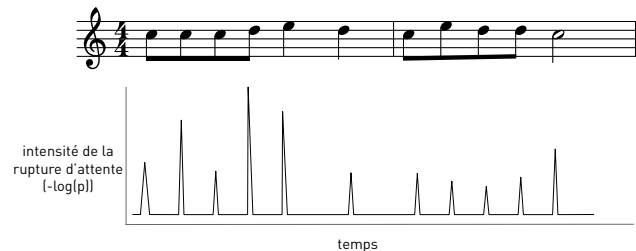


FIGURE 5 – Evolution de la rupture d'attente au cours du temps pour le début de *Au clair de la lune*, présenté en fig.3.

L'attente musicale, un processus cognitif

Un potentiel évoqué (ERP) est une technique permettant d'obtenir une réponse cérébrale moyenne à un événement particulier. Pour cela un enregistrement EEG est utilisé à partir duquel nous calculons la moyenne des réponses à un stimulus sur plusieurs répétitions. Une étude récente a montré que, dans le cas de l'écoute musicale, les notes pour lesquelles IDyOM estime une grande rupture d'attente ont un ERP très différent des

notes pour lesquelles IDyOM estime une faible rupture d'attente, suggérant que le cerveau encode cette information. La figure suivante montre ces ERPs (fig. 6).

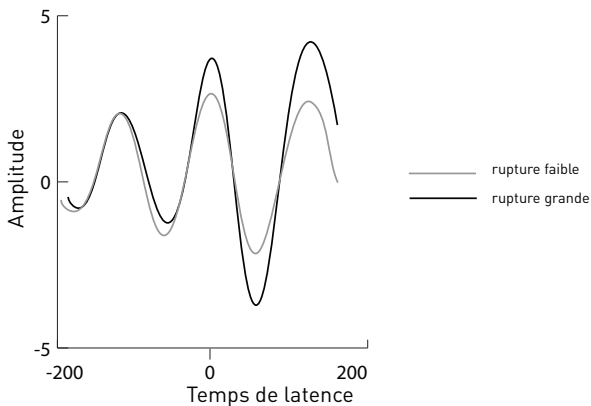


FIGURE 6 – Potentiels évoqués pour les notes les plus surprenantes (noir) et les notes les moins surprenantes (gris) pour l'électrode cz (cortex auditif) [2].

Afin d'évaluer comment l'information est encodée dans le cortex, nous pouvons utiliser d'autres méthodes reposant sur l'analyse des données EEG non-moyennées. Une méthode efficace consiste à appliquer une régression linéaire¹ entre une caractéristique donnée ($s(t)$) du stimulus (le signal de rupture d'attente dans notre cas) et le signal EEG ($r(t, k)$) afin de calculer une corrélation entre le signal prédit ($f(s(t))$) et le signal observé ($r(t, k)$). La régression linéaire s'est avérée très efficace pour saisir la dynamique des données temporelles de l'EEG.

Si cette transformation f permet de prédire $r(t, k)$ avec une grande précision, cela signifie que le signal $s(t)$ contient beaucoup d'informations sur $r(t, k)$ et qu'un signal similaire est traité dans le cerveau (figure 7). Si la corrélation est faible, alors, on ne peut rien dire, car la faible corrélation peut être due à des non-linéarités, à la non-pertinence de la caractéristique $s(t)$ ou à des difficultés expérimentales comme un mauvais rapport signal-bruit.

Une étude récente [2] a montré que le signal de surprise fourni par IDyOM est capable de prédire de manière fiable les réponses EEG enregistrées lors de l'écoute musicale. Cela suggère que la surprise est une information pertinente et nous pouvons émettre l'hypothèse qu'un mécanisme cérébral, à chaque instant, prédit la note suivante et produit une réponse proportionnelle à la rupture de l'attente. De plus, cette méthode nous permet d'évaluer la pertinence de différents modèles d'attente mélodique (entraînés sur différents corpus) en estimant leur corrélation avec les enregistrements EEG comme indicateur.

1. Une régression linéaire entre A et B consiste à trouver W , tel quel $A \cdot W \approx B$. Il permet donc de donner une fonction $f(A) = A \cdot W$ qui approxime B .

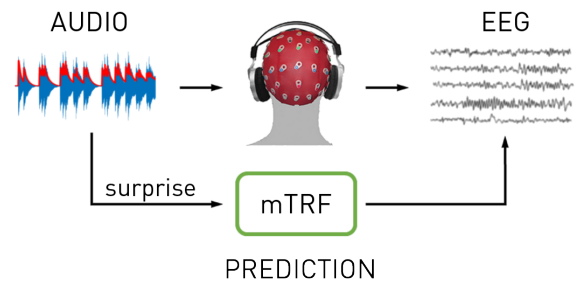


FIGURE 7 – Nous prédisons le signal de l'EEG à partir d'une caractéristique donnée des stimuli, cette méthode est appelée fonction de réponse temporelle multivariée (mTRF) [11].

Subjectivité de ces mécanismes

De récentes études, de l'ordre de l'ethnographie cognitive, ont montré une possible subjectivité de la perception lors de l'écoute d'événements sonores simples mais étant au coeur de la perception musicale : le rythme et la hauteur. Une étude a montré que lors de la synchronisation rythmique à des rythmes répétés, des auditeurs américains révélaient un biais de performance (meilleure synchronisation) considérable vers les rythmes ayant des rapports simples entre eux ($1/2$, $1/3$, ...), correspondant à des rythmes pouvant être écrit simplement avec la notation occidentale (utilisant noires, croches ou blanches). Les auteurs ont répété la même expérience avec des membres de la tribu *Tsimané* en Bolivie Amazonienne et ont découvert que les auditeurs de cette tribu étaient biaisés vers différents rythmes, ce biais reste néanmoins consistant entre les individus [6]. Cette étude suggère que différents auditeurs peuvent avoir des attentes rythmiques différentes selon leur culture. Dans notre paradigme, cela correspondrait à différents modèles internes d'attente musicale qui se seraient constitués différemment par exposition à différentes musiques.

D'autres études ont augmenté cette observation entre le Mali, la Bulgarie et l'Allemagne [7] et ont trouvé que les rythmes $1:1$ (noire, noire) et $2:1$ (blanche, noire) étaient partagés parmi tous les participants mais que les rythmes $3:2$ (blanche pointée, blanche) et $4:3$ (ronde, blanche pointée) étaient dépendants de la culture.

Finalement, une récente étude a investigué chez les *tsimanés* la question de la hauteur [8] et a montré que les auditeurs *tsimanés* et américains possédaient une perception logarithmique de la hauteur (comme mentionné depuis longtemps dans les études occidentales) mais que seulement les auditeurs américains percevaient une équivalence de l'octave (deux notes espacées d'une octave sont équivalentes d'un point de vue musical)

Ces études dévoilent une preuve d'une subjectivité de la perception musicale compatible avec l'idée d'attente musicale générée par un modèle interne construit par

exposition. Néanmoins, ces études révèlent seulement une subjectivité à des événements sonores synthétiques (par opposition à de la musique naturelle) et ne disent que très peu de la notion de grammaire musicale.

Imagination et mécanismes d'attente

Lors de mes précédents travaux au sein du Laboratoire des Systèmes Perceptifs, j'ai eu la chance de mettre en évidence l'importance des mécanismes d'attente musicale lors de l'imagination [12].

Edwin Gordon, théoricien américain de l'apprentissage musical a proposé en 1975 [13] le terme *audiation* (*chant intérieur* en français) pour désigner la compréhension et la réalisation interne de la musique, autrement dit, la sensation d'entendre ou de sentir un son individuel quand il n'est pas physiquement présent. Il suggère que «audiation is to music what thought is to language». Ses recherches sont fondées sur les similitudes entre la façon dont les individus apprennent une langue et la façon dont ils apprennent à faire et à comprendre la musique, suggérant que le chant intérieur (imagination) est un mécanisme primordial de la perception et de la réflexivité sur l'objet musical. Lors de nos recherches nous avons demandé à des musiciens professionnels² d'apprendre quatre chorals de Bach. Un enregistrement encéphalographique (EEG) a été réalisé pendant l'imagination ainsi que pendant l'écoute passive de ces mélodies.

Dans sa théorie, Edwin Gordon définit plusieurs niveaux de prédispositions musicales acquis par la capacité de chant intérieur. Le plus élevé est le suivant :

Stage 6 : Anticipating and predicting tonal patterns and rhythm processes [14].

Cela propose ainsi que les mécanismes d'attente musicale sont intimement liés au chant intérieur. Notre analyse a permis de mettre en évidence que les mécanismes cérébraux d'attente étaient conservés pendant cette condition. Pour cela, nous avons montré que les signaux de rupture d'attente musicale étaient similairement encodés dans les données EEG dans la condition d'écoute et dans la condition d'imagination.

Cela suggère que les mécanismes internes d'attente musicale ne sont pas seulement dus à la stimulation par un événement sonore mais bien auto-générés et liés à une représentation interne de la musique, motivant une compréhension plus profonde de ces mécanismes.

Émotions et attentes musicales

De nombreuses études suggèrent que ces mécanismes sont au coeur de notre rapport à la musique et qu'ils sont à l'origine de la production de dopamine dans le *striatum mesolimbique* [15] [16], associé au système de

récompense chez les vertébrés [17]. Il été mis en évidence que cette zone était plus active et plus productive de dopamine durant l'écoute de pièces musicales appréciées par les participants que pendant l'écoute de pièces non appréciées [16]. Aussi, ce mécanisme était corrélé avec la production de frissons dans le dos pendant l'écoute de musique [15]. Or, le *nucleus accumbens*, faisant partie du striatum mesolimbique et aussi associé aux mécanismes de production de prédictions et d'anticipations [18] [19]. De ce fait, Robert Zatorre fait l'hypothèse que les mécanismes de production de dopamine associés au plaisir musical sont intimement lié aux mécanismes d'attentes musicales [20].

Quelques études se sont penchées sur la question et ont montré, par exemple, que dans le cas de successions d'accords, les accords introduisant une forte rupture d'attente et une faible incertitude (beaucoup d'assurance qu'un autre accord aurait dû être joué) ou une faible rupture et une grande incertitude (faible assurance que l'accord devait être joué) génèrent plus de plaisir que les autres accords. Ces conditions correspondent à un accord inattendu dans un contexte très prédictif (correspondant à la grammaire interne) ou un accord attendu dans un contexte peu prédictif (peu connu de la grammaire interne) [4].

Une analyse à partir de données d'IRM fonctionnel a montré que ce mécanisme était lié à l'activité dans l'*amygdala*, l'*hippocampus* et le cortex auditif, malgré tout, le *nucleus accumbens*, connu pour être lié aux mécanismes de prédiction et d'anticipation, reflétait seulement l'évaluation de l'incertitude. Une autre étude, seulement comportementale cette fois, corrobore ces résultats et suggère que la sensation procurée dans le *nucleus accumbens* par la production de dopamine sert de signal de retour d'information permettant d'ajuster le modèle interne d'attente [3], comme déjà mis en évidence dans d'autres domaines [21]. La sensation de plaisir liée aux attentes musicales serait ainsi liée à l'apprentissage de grammaire musicales internes durant l'écoute.

Plus généralement, ces études proposent que le plaisir, et peut-être d'autres émotions plus générales comme le suggère Robert Zatorre, seraient générés à partir de la structure du signal de rupture d'attente. Or, ce signal serait calculé à l'aide d'un modèle interne, probablement variable et subjectif. Ainsi, pour étudier les mécanismes de production d'émotions, il est nécessaire de s'intéresser aux mécanismes de d'attente musicale à l'échelle de l'individu. Le sentiment de beauté, quant à lui, n'a jamais été relié aux mécanismes d'attente musicale, notre travail s'attachera à tenter de répondre à cette question.

2. L'expérience pilote a été réalisée l'année dernière avec M. Grégoire Blanc, musicien professionnel de thérémine.

Méthodologie et expériences

Problématisation

Il a donc été mis en évidence que le cortex auditif calculerait, à partir d'un modèle grammatical interne, probablement culturel et appris lors de l'écoute de musique, un signal de rupture d'attente musicale. En lien avec l'amygdala et l'hippocampus, le striatum mesolimbique permettrait alors de générer une sensation de plaisir en relâchant de la dopamine en réponse à certaines structures du signal de rupture d'attente. Reste assez incomprise la façon dont le sentiment de beauté serait lié à ces mécanismes et si la subjectivité de la perception des attentes musicales serait le seul biais subjectifs au sentiment de beauté.

Ce constat pose la question de la subjectivité de la perception musicale et de l'origine du sentiment de beau. C'est à ces questions que nous allons tenter de répondre par le biais de différentes expériences cognitives reposant sur l'enregistrement de données cérébrales ou comportementales révélatrices des mécanismes de rupture d'attente musicale. Tout d'abord, nous chercherons à savoir si les mécanismes d'attente musicale sont plastiques, puis nous tenterons de les modéliser à l'échelle de l'individu afin de comparer les modèles d'auditeurs issus de différentes cultures musicales. Finalement, nous utiliserons ces modèles pour estimer les signaux de rupture interne et les relier à l'intensité du sentiment de beauté.

Nous pourrions ainsi mieux comprendre les mécanismes à l'oeuvre dans la production du sentiment de beau et repenser la question de l'universalité des ces mécanismes.

Plasticité cérébrale et apprentissage musical

Afin de savoir si les mécanismes d'attente musicale sont en effet liés à un modèle grammatical appris de la musique nous avons mis en place une expérience faisant naître une collaboration avec le Poeppel's Lab du département de psychologie de l'université de New-York. Ce projet tente de montrer que ces mécanismes internes d'attente musicale sont affinés lors de l'exposition passive à de la musique non-familière.

À cette fin, le signal cérébral est enregistré avant et après exposition des participants à un corpus de musique collecté par des ethnomusicologues dans la commune de Shanxi en Chine. Ces mélodies sont issues d'un même corpus très homogène et qui était inconnu et non-familier des participants. Le signal de rupture de l'attente musicale est calculé par notre modèle à partir de ces données spécifiques a été comparé aux enregistrements cérébraux. Lors de nos analyses préliminaires nous avons trouvé, après exposition, une forte amélioration de la corrélation du signal idéal de rupture (calculé à partir du corpus) avec les enregistrements céré-

braux. Cela suggère que le signal de surprise interne des participants s'est déplacé vers le signal idéal durant l'exposition (fig.8) et montre par conséquent une plasticité cérébrale ayant pour but d'affiner le modèle interne d'attente musicale.

Le modèle interne d'attente musicale pourrait donc être modifié au cours du temps par simple exposition passive à de la musique. Cela propose que ce modèle pourrait être différent pour chaque individu et appris par exposition passive à la musique.

Evolution de la représentation du signal d'attente musicale

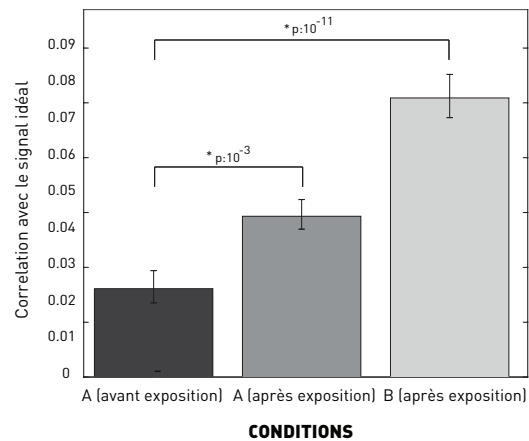


FIGURE 8 – Cadre de l'expérience : les signaux de magnétoencéphalographie (MEG) sont enregistrés pendant l'écoute du corpus A, puis l'auditeur est exposé à un large corpus C, la MEG est de nouveau enregistrée après l'exposition à un corpus B ainsi que sur le même corpus A présenté avant exposition. Les signaux de rupture d'attente ont été calculés avec IDyOMpy (guimarion.github.io/IDyOM/) en utilisant un modèle entraîné sur les pièces d'exposition. Nous avons utilisé la technique mTRF pour prédire l'électrode 122 (cortex auditif droit) des données MEG à partir du signal d'attente musicale. Un t-test a été utilisé pour calculer des statistiques (p-values) agrégées sur 3 participants avec les coefficients de Pearson avant et après exposition (indiquées entre les barres).

Estimation du modèle interne

Étant donné que les mécanismes internes d'attente musicale sont probablement variables et subjectifs, il serait très restrictif de seulement comparer les signaux idéaux (calculés à partir du modèle entraîné) de rupture d'attente avec les enregistrements cérébraux. À cette fin, nous proposons une méthode permettant d'enregistrer directement les valeurs de rupture et d'en estimer un modèle individuel d'attente musicale.

De nombreuses études en psychologie musicale ont montré que lors de l'écoute d'une mélodie, les participants demandés de relever le changement aléatoire du timbre d'une note montrent des temps de réaction cor-

rélés à l'attente grammaticale [22] [23]. Nous envisageons d'utiliser ce paradigme (*melodic priming*) afin de reconstruire le modèle d'attente musicale.

Nous utiliserons le modèle IDyOM déjà existant comme point de départ, néanmoins, au lieu de l'optimiser à partir d'un corpus musical nous utiliserons les données cognitives issues de notre expérience. Une descente de gradient sur les paramètres du modèle sera faite afin de minimiser la différence entre les valeurs normalisées de temps de réaction et les valeurs prédites par le modèle. Le modèle sera ensuite évalué sur une partie des données qui ne sera pas utilisée pendant l'optimisation.

Nous enregistrerons, dans un second temps, l'EEG sur de nouvelles données afin de voir si le modèle optimisé à partir des données d'un participant spécifique génère des valeurs de rupture d'attente plus corrélées aux données EEG que le modèle idéal optimisé à partir d'un corpus musical.

Cette technique nous permettra d'estimer le modèle interne d'un participant et ouvre ainsi la porte à de nombreuses nouvelles expériences sur la subjectivité musicale ainsi qu'aux études culturelles de la perception musicale.

Subjectivité Culturelle

Afin de montrer que les mécanismes d'attente musicale sont bien des mécanismes culturels variant entre individus nous avons la volonté de travailler avec des participants issus de cultures sensiblement différentes. A cette fin, nous organiserons un voyage dans la commune de Shanxi en Chine afin de collecter des données de temps de réaction et éventuellement des données EEG³ afin d'estimer leur modèle interne. Nous hypothétisons que la distance entre les modèles issus de participants occidentaux (New-York ou Paris) seront globalement faibles mais que la distance entre ces modèles et les modèles des participants de la commune de Shanxi sera, quant à elle, grande.

Cela permettrait de mettre en évidence la variabilité culturelle des mécanismes d'attente musicale.

Beauté musicale

Une fois mise en place, cette méthode d'estimation du modèle interne des auditeurs nous permettra de savoir quel signal de rupture d'attente est calculé dans le cortex auditif d'un unique individu, reliant chaque auditeur à sa sensibilité et sa singularité. Nous essaierons donc de comprendre comment ce signal, déjà connu pour être relié au plaisir musical, est relié à la notion de beau. Pour ce faire, nous nous placerons en décalage des études déjà existantes où le plaisir était évalué au cours du temps, note par note. Nous essaierons de comprendre la notion de beauté à l'échelle d'extraits

3. Le laboratoire possède un EEG portable que j'ai déjà pu utiliser lors d'un voyage à Montréal pour collecter des données de musiciens professionnels pour notre projet sur l'imagination.

de 20 secondes. En effet, nous pensons que l'idée de beauté réside dans les interactions musicales, dans la façon dont notes et accords construisent un discours commun. C'est pourquoi nous demanderons aux participants de noter l'intensité du sentiment de beauté ressenti durant l'intégralité de chaque extrait. Le modèle interne de chaque auditeur sera évalué afin de générer le signal de rupture d'attente pour chacun des extraits et nous tenterons de relier la structure temporelle de ce signal à l'évaluation du sentiment de beau par les participants. Nous pourrions alors avoir un modèle de l'accès à la beauté indépendamment des mécanismes de perception des ruptures musicales et ainsi investiguer la question de l'universalité des mécanismes d'accès à la beauté.

Cartographie culturelle

Naturellement, en raison de la simplicité du paradigme de *melodic priming*, ces projets pourront se conclure par la collecte d'une grande quantité de données en ligne afin d'estimer le modèle interne d'un grand nombre de participants et ce partout dans le monde. Ces données pourront être utilisées afin de cartographier les rapports culturels entre différentes zones géographiques et leur rapport à la beauté. Les mécanismes d'accès à la beauté sont-ils partagés autour du globe? La diversité de l'accès au beau serait-il seulement dû à la question de la perception des ruptures d'attente musicale?

Projets artistiques

Le premier projet, dont la description complète est en annexe, sera réalisé en collaboration avec la photographe Alice Tremblot de La Croix sous la forme d'une installation sensorielle (vidéo de présentation [ici](#)).

Le projet artistique final, quant à lui, sera réalisé à partir de ces modèles d'attente musicale. En effet, de tels modèles peuvent servir à générer de la musique [24] [25] mais aussi à aider la composition [26]. Les données issues de la cartographie culturelle seront utilisées pour écrire des variations d'une certaine mélodie à partir des modèles de tous les auditeurs de nos expériences et ainsi faire vivre pleinement la question de la subjectivité au spectateur. En effet, cette technique consistera à composer différentes mélodies générant des signaux cérébraux similaires. Ce projet, consistant en une installation contenant toutes ces variations et une courte biographie de chaque auditeur, sera une invitation à un voyage ethnographique, géographique et, avant tout, cognitif.

Contexte et programme de travail

Cadre de travail et partenariat

Ce projet sera supervisé par M. Shihab Shamma, professeur au sein du Laboratoire des Systèmes Perceptifs

de l'École Normale Supérieure. Mon lieu de travail sera principalement situé au laboratoire du 29 rue d'Ulm où je bénéficierai d'un bureau ainsi que du matériel nécessaire à mes recherches. Le laboratoire s'est construit sur une tissu très interdisciplinaire et prend à coeur de supporter la recherche connectant les sciences humaines, les arts et les sciences cognitives. De nombreux chercheurs participent à l'efforts du laboratoire et me permettront d'obtenir de l'aide dans des domaines aussi différents que la neurophysiologie, le traitement du signal, l'intelligence artificielle ou la perception auditive. L'École Normale Supérieure, partageant les mêmes valeurs de pluridisciplinarité, me permettra de me former et de m'informer quant à des sujets plus divers tels que l'histoire et la théorie des arts, la sociologie et l'anthropologie.

Au delà de ce riche substrat que représente le laboratoire et plus généralement l'École Normale Supérieure, de nombreuses collaborations internationales déjà existantes seront consolidées. Tout d'abord, un partenariat de fond sera continué avec le Poepel's Lab du département de psychologie de l'université de New-York. Ce laboratoire, membre du CLAME, est spécialisé dans l'audition et travaille particulièrement sur la musique, le langage et les émotions. J'ai déjà eu la chance d'y être invité à travailler pour 6 semaines en début d'année 2020, cela m'a permis d'y collecter des données MEG (matériel dont nous ne disposons pas à Paris) et interagir activement avec les membres du laboratoire. Un autre partenariat sera aussi continué à l'université de Princeton avec le Music Cognition Lab dirigé par Elizabeth Margulis, spécialiste en cognition musicale et plus particulièrement de la question de la répétition en musique. Ce partenariat déjà engagé, m'ayant valu une visite du laboratoire en février 2020, afin d'échanger à propos de l'effet de la répétition sur les mécanismes d'attente musicale.

La chaire de recherche « Beauté(s) » proposant une interaction intellectuelle riche entre divers communautés de recherche autour de la question du beau me permettra de rester en contact avec d'autres disciplines s'intéressant aux mêmes questions que moi, mais aussi de confronter mon travail et ma méthodologie à ces autres disciplines. De plus, le financement de recherche accompagnant l'allocation doctorale permettra de financer les voyages du projet ainsi que le coût des expériences.

Riche de son cadre académique ainsi que de ses partenariats, ce projet tentera de faire communiquer sciences cognitives, esthétique et création pour la compréhension de la notion de beauté. Ce projet présente donc une thèse de doctorat singulière s'inscrivant parfaitement dans les valeurs de la chaire de recherche « Beauté(s) ».

Calendrier prévisionnel

Le calendrier prévisionnel établi en Table 1 décrit l'organisation du travail. Il se peut que ce calendrier soit légèrement modifié en fonction des politiques d'ouverture des frontières, du fonctionnement des laboratoires ainsi que des résultats des travaux.

	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4
Première année	Séjour à NYU et Princeton. Collecte données et analyse projet apprentissage.	Rédaction article apprentissage musical. Design expérience priming.	Préparation de la première exposition. Collecte données expérience priming à Paris.	Telluride Neuromorphic Workshop. Congés.
Deuxième année	Séjour NUY et Princeton. Collecte données projet melodic priming à New-York. Préparation voyage Chine. Première exposition.	Analyse et rédaction article melodic priming. Design expérience en Chine.	Voyage en Chine et collection de données.	Capocaccia Cognitive Neuromorphic Workshop. Analyse données collectés en Chine. Congés.
Troisième année	Séjour NUY et Princeton. Rédaction projet subjectivité culturelle. Mise en place du système de collecte de données en ligne.	Rédaction thèse. Analyse données en ligne.	Rédaction thèse. Rédaction article cartographie culturelle. Préparation exposition.	Rédaction thèse. Exposition finale.

TABLE 1 – Calendrier prévisionnel

Références

- [1] M. T. Pearce. *The Construction and Evaluation of Statistical Models of Melodic Structure in Music Perception and Composition*. PhD thesis, 2005.
- [2] Giovanni M Di Liberto, Claire Pelofi, Roberta Bianco, Prachi Patel, Ashesh D Mehta, Jose L Herrero, Alain de Cheveigné, Shihab Shamma, and Nima Mesgarani. Cortical encoding of melodic expectations in human temporal cortex. *eLife*, 9 :e51784, mar 2020.
- [3] Benjamin P. Gold, Marcus T. Pearce, Ernest Mas-Herrero, Alain Dagher, and Robert J. Zatorre. Predictability and uncertainty in the pleasure of music : A reward for learning? *Journal of Neuroscience*, 39(47) :9397–9409, 2019.
- [4] Vincent K.M. Cheung, Peter M.C. Harrison, Lars Meyer, Marcus T. Pearce, John-Dylan Haynes, and Stefan Koelsch. Uncertainty and surprise jointly predict musical pleasure and amygdala, hippocampus, and auditory cortex activity. *Current Biology*, 29(23) :4084 – 4092.e4, 2019.
- [5] M. T. Pearce. Statistical learning and probabilistic prediction in music cognition : mechanisms of stylistic enculturation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, (1423), 2018.
- [6] Nori Jacoby and Josh H. McDermott. Integer ratio priors on musical rhythm revealed cross-culturally by iterated reproduction. *Current Biology*, 27(3) :359–370, 2020/04/23 2017.
- [7] Rainer Polak, Nori Jacoby, Timo Fischinger, Daniel Goldberg, Andre Holzapfel, and Justin London. Rhythmic prototypes across cultures. *Music Perception : An Interdisciplinary Journal*, 36(1) :1–23, 2018.
- [8] Nori Jacoby, Eduardo A. Undurraga, Malinda J. McPherson, Joaquín Valdés, Tomás Ossandón, and Josh H. McDermott. Universal and non-universal features of musical pitch perception revealed by singing. *Current Biology*, 29(19) :3229–3243.e12, 2020/04/23 2019.
- [9] J.-J. Nattiez. *Musicologie générale et sémiologie*. Christian Bourgois Editeur, 1987.
- [10] Ferdinand de Saussure. *Cours de linguistique générale*. Payot Paris, 1965.
- [11] Michael J. Crosse, Giovanni M. Di Liberto, and Edmund C. Lalor. The multivariate temporal response function (mtrf) toolbox : a matlab toolbox for relating neural signals to continuous stimuli. *Frontiers of Human Neuroscience*, 10(604), 2016.
- [12] Guilhem Marion, Giovanni Di Liberto, and Shihab Shamma. Musical expectation mechanisms are conserved during musical imagery. in submission.
- [13] R. C. Gerhardstein. The historical roots and development of audiation : A process for musical understanding. In Hanley, B. Goolsby, T.W. (Eds.) *Musical understanding : Perspectives in theory and practice*, 2002.
- [14] Edwin Gordon. *Learning Sequences in Music : A Contemporary Learning Theory*. Chicago : GIA Publications, 2007.
- [15] Anne J. Blood and Robert J. Zatorre. Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(20) :11818–11823, 2001.
- [16] Valorie N Salimpoor, Mitchel Benovoy, Kevin Larcher, Alain Dagher, and Robert J Zatorre. Anatomically distinct dopamine release during anticipation and experience of peak emotion to music. *Nature Neuroscience*, 14(2) :257–262, 2011.
- [17] J OLDS and P MILNER. Positive reinforcement produced by electrical stimulation of septal area and other regions of rat brain. *Journal of comparative and physiological psychology*, 47(6) :419—427, December 1954.
- [18] Samuel M McClure, Gregory S Berns, and P. Read Montague. Temporal prediction errors in a passive learning task activate human striatum. *Neuron*, 38(2) :339–346, 2020/05/08 2003.
- [19] Mathias Pessiglione, Ben Seymour, Guillaume Flandin, Raymond J. Dolan, and Chris D. Frith. Dopamine-dependent prediction errors underpin reward-seeking behaviour in humans. *Nature*, 442(7106) :1042–1045, 2006.
- [20] Robert J. Zatorre and Valorie N. Salimpoor. From perception to pleasure : Music and its neural substrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(Supplement 2) :10430–10437, 2013.
- [21] Hanneke E M den Ouden, Jean Daunizeau, Jonathan Roiser, Karl J Friston, and Klaas E Stephan. Striatal prediction error modulates cortical coupling. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 30(9) :3210–3219, 03 2010.
- [22] Elizabeth Margulis and William Levine. Timbre priming effects and expectation in melody. *Journal of New Music Research*, 35 :175–182, 06 2006.
- [23] Diana Omigie, Marcus Pearce, and Lauren Stewart. Tracking of pitch probabilities in congenital amusia. *Neuropsychologia*, 50 :1483–93, 03 2012.
- [24] Gaëtan Hadjeres, François Pachet, and Frank Nielsen. DeepBach : a steerable model for Bach chorales generation. In Doina Precup and Yee Whye Teh, editors, *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning*, volume 70 of *Proceedings of Machine Learning Research*, pages 1362–1371, International Convention Centre, Sydney, Australia, 06–11 Aug 2017. PMLR.
- [25] Cheng-Zhi Anna Huang, Ashish Vaswani, Jakob Uszkoreit, Noam Shazeer, Curtis Hawthorne, Andrew M. Dai, Matthew D. Hoffman, and Douglas Eck. An improved relative self-attention mechanism for transformer with application to music generation. *CoRR*, abs/1809.04281, 2018.
- [26] Jon Gillick, Kevin Tang, Robert M. Keller, and Harvey Mudd Collge. Learning jazz grammars. In *in Proceedings of the SMC 2009 - 6th Sound and Music Computing Conference*, 2009.