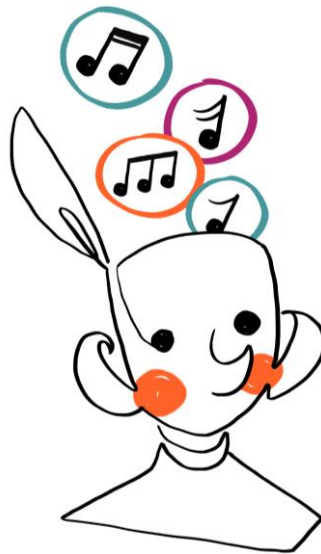


Ecole Doctorale des Sciences de l'Homme et de la Société

Unité de recherche PSITEC ULR 4072

Université de Lille

# Neuropsychologie des émotions et de la mémoire musicale dans l'épilepsie du lobe temporal



Thèse en vue de l'obtention du grade de Docteur en Psychologie présentée et soutenue  
publiquement le 12 décembre 2022 par

Clémence NINEUIL

Sous la co-direction du Pr. Séverine SAMSON et du Dr. Delphine DELLACHERIE

## Composition du jury

|                          |                                             |                        |
|--------------------------|---------------------------------------------|------------------------|
| Dr. Laura FERRERI        | Università di Pavia<br>Université de Lyon 2 | Examinatrice           |
| Pr. Nathalie GOSSELIN    | Université de Montréal                      | Rapportrice            |
| Pr. Marion LUYAT         | Université de Lille                         | Présidente du jury     |
| Pr. Hervé PLATEL         | Université de Caen                          | Rapporteur             |
| Pr. Séverine SAMSON      | Université de Lille                         | Co-Directrice de thèse |
| Dr. Delphine DELLACHERIE | Université de Lille                         | Co-Directrice de thèse |



Cette thèse a reçu le soutien financier du Conseil Régional des Hauts de France ainsi que de l'Université de Lille.

A Raymonde

## Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent à mes co-directrices de thèse, Delphine Dellacherie et Séverine Samson. Je me souviens encore du premier rendez-vous que j'ai eu avec toi Delphine afin d'être sélectionnée pour réaliser mon mémoire de Master 1 avec vous deux. Je n'aurais jamais pu imaginer que ce rendez-vous m'amènerait aussi loin. Je vous remercie d'avoir partagé avec moi votre passion pour la recherche, pour votre disponibilité très tôt le matin jusqu'à très tard le soir et pour m'avoir toujours poussé à aller plus loin dans ma réflexion.

J'exprime ma profonde gratitude auprès des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce projet. Je remercie ainsi Pr. Nathalie Gosselin et Pr. Hervé Platel d'avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse en tant que rapporteurs ainsi que Dr. Laura Ferreri et Pr. Marion Luyat.

Je remercie le Conseil Régional des Hauts de France ainsi que de l'Université de Lille pour avoir apporté leur soutien financier et permis ce travail de thèse.

Je tiens à remercier l'Unité d'épilepsie de l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière. Un grand merci à Marisa Denos, Sophie Dupont, Véronique Masson, Bertrand Mathon et Marie Méré pour toute l'aide qu'ils m'ont apportée (allant des tutos pour maîtriser Orbis à la recherche de dossiers de patients perdus, en passant par la sélection des patients dans les multiples bases de données).

Je remercie tout le laboratoire PSITEC et plus particulièrement Marion Luyat pour son soutien et son écoute lors de ma dernière année de thèse, les membres de l'axe Neuropsychologie et Audition pour l'aide qu'ils m'ont apportée lors des présentations pendant les séminaires d'axes, les membres du conseil de laboratoire au sein duquel j'ai pu m'engager pendant deux ans ainsi qu'à Anne-Sophie Thullier, pour son aide face aux méandres administratifs. Je tiens également à remercier chaleureusement, Christine Humez, la « maman des doctorants » qui a toujours LA solution face à tous nos problèmes. Mais que ferait-on sans vous Christine ?! Merci pour toutes nos conversations offs, nos cafés toujours accompagnés de biscuits au Nutella et pour votre soutien.

Je remercie Pr. Yannick Courbois et Pr. Christine Moroni, qui ont constitué mon Comité de Suivi de Thèse, pour leurs précieux conseils donnés pendant nos réunions.

Passons maintenant au soutien moins scientifique mais tout aussi essentiel.

Je remercie avec une grande émotion ma famille pour tout son soutien et son amour. Merci de m'offrir ce petit cocon, à Poitiers ou à Fouras, où je me sens si bien et où j'ai pu me ressourcer pour ensuite affronter cette thèse. Merci pour vos relectures attentives de mes écrits, depuis le CP jusqu'à ce manuscrit (si ça ne n'est pas de l'amour...).

Des milliers de merci au G5 et aux Biardaises, même si vous vous demandiez sûrement ce que je pouvais bien faire de mes journées, vous m'avez encouragée sans relâche et soutenu pendant les hauts et les bas de cette thèse. Même à l'autre bout de la France vous arrivez toujours à me redonner le sourire. Vous êtes tout simplement mes piliers.

Les Gow, j'ai découvert la psychologie avec vous, ma passion pour la neuropsychologie et surtout la vie étudiante. Merci pour votre soutien, vos snaps qui me font mourir de rire et nos week-ends. Une mention spéciale à ma coloc de toujours, malgré la distance, à chacune de nos retrouvailles, j'ai l'impression de t'avoir vu la veille.

Le Crou, quand je suis arrivée à Lille en Master 1, j'étais totalement déboussolée, vous m'avez appris à ne (presque) plus me perdre dans les couloirs de la fac, à aimer Lille et la bière. C'est aussi grâce à vous qu'est née mon envie de partir en recherche. Un grand merci pour tout ça. Je rajouterais une petite mention spéciale pour les girls du groupe, merci pour nos soirées papotages toujours accompagnées d'une petite boisson chaude.

Je dois également remercier un autre groupe de Lillois, les B.B. Vous ne comprenez absolument rien à mon sujet de thèse mais c'est justement ça que j'aime chez vous ! Grâce à vous j'ai passé des supers soirées sans penser une seule fois au travail (et ça c'est un exploit). Merci pour vos blagues (plus ou moins lourdes), les raclettes, les concerts, les festivals, ou encore les madeleines.

Un énorme merci à tous les doctorants de PSITEC, des plus anciens qui sont déjà docteurs aux petits (anciens) nouveaux, en passant par ceux qui sont entrés en thèse en même temps que moi. Quelle chance j'ai eu d'intégrer un laboratoire où les doctorants sont si soudés. Vous avez toutes et tous contribué, chacun à votre façon, à remplir ces années de thèse de rire, de café noisette, de verres post-séminaire ainsi que non post-séminaire. Je n'oublierai jamais ces années de thèse passées à vos côtés !

Enfin, je me devais de terminer ces remerciements par toi, mon binôme si particulier depuis le début de cette thèse. Je ne te remercierai jamais assez pour ton soutien indéfectible, ton humour (indéfectible ?), tes petites attentions, tes millions de relectures, ton petit Truc en plus, tes bons petits plats, tes petits mots et bien plus encore... Cette thèse n'aurait jamais été la même sans toi, merci de l'avoir rendue plus belle.



# Table des matières

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Résumé.....                                                                                                                                | 13 |
| Abstract.....                                                                                                                              | 14 |
| Préface.....                                                                                                                               | 16 |
| PARTIE THÉORIQUE.....                                                                                                                      | 20 |
| CHAPITRE I : Modèles et substrats cérébraux des émotions musicales .....                                                                   | 22 |
| 1. Les modèles théoriques de l'émotion musicale .....                                                                                      | 22 |
| 2. Les substrats neuronaux des émotions musicales .....                                                                                    | 24 |
| CHAPITRE II : Épilepsie pharmaco-résistante du lobe temporal, un modèle neuropathologique pour l'étude de la mémoire et des émotions ..... | 28 |
| 1. Épilepsie pharmaco-résistante.....                                                                                                      | 28 |
| 1.1.Définition et données épidémiologiques .....                                                                                           | 28 |
| 1.2.Classifications.....                                                                                                                   | 29 |
| 1.3.Épilepsie du lobe temporal .....                                                                                                       | 29 |
| 2. Neuropsychologie de l'épilepsie pharmaco-résistante du lobe temporal.....                                                               | 30 |
| 2.1.Troubles cognitifs .....                                                                                                               | 31 |
| 2.2.Troubles de l'humeur.....                                                                                                              | 32 |
| 2.3.Troubles de la cognition sociale .....                                                                                                 | 32 |
| 3. Traitement chirurgical de l'épilepsie pharmaco-résistante du lobe temporal .....                                                        | 33 |
| 3.1.Les différentes techniques de chirurgie .....                                                                                          | 33 |
| 3.2.L'impact de la chirurgie.....                                                                                                          | 34 |
| CHAPITRE III : Musique et épilepsie.....                                                                                                   | 38 |
| 1. Introduction .....                                                                                                                      | 39 |
| 2. L'épilepsie et ses particularités .....                                                                                                 | 40 |
| 3. La perception musicale .....                                                                                                            | 41 |
| 4. La mémoire musicale .....                                                                                                               | 44 |

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5. Les émotions musicales.....                                                                                                                    | 45 |
| 6. L'expertise musicale et le transfert d'apprentissage .....                                                                                     | 48 |
| 7. Conclusion .....                                                                                                                               | 50 |
| CHAPITRE IV : Effet des émotions musicales sur la mémoire .....                                                                                   | 52 |
| 1. Mémoire émotionnelle non musicale .....                                                                                                        | 52 |
| 1.1.Effets de l'arousal .....                                                                                                                     | 52 |
| 1.2.Effets de la valence .....                                                                                                                    | 55 |
| 1.3.Effets de l'arousal et de la valence émotionnelle .....                                                                                       | 57 |
| 2. Effet du délai .....                                                                                                                           | 59 |
| 3. Mémoire émotionnelle musicale .....                                                                                                            | 61 |
| 3.1.Population témoin.....                                                                                                                        | 61 |
| 3.2.Population clinique avec une lésion du lobe temporal .....                                                                                    | 64 |
| Objectifs de la thèse et questions de recherche.....                                                                                              | 67 |
| PARTIE EXPÉRIMENTALE .....                                                                                                                        | 70 |
| ARTICLE I: The impact of emotion on musical long-term memory .....                                                                                | 72 |
| 1. Introduction.....                                                                                                                              | 74 |
| 2. Methods.....                                                                                                                                   | 78 |
| 2.1.Participants .....                                                                                                                            | 78 |
| 2.2.Stimuli.....                                                                                                                                  | 79 |
| 2.3.Procedure .....                                                                                                                               | 79 |
| 2.4.Data Analysis.....                                                                                                                            | 80 |
| 3. Results .....                                                                                                                                  | 80 |
| 3.1.Preliminary analysis.....                                                                                                                     | 80 |
| 3.2.Recognition task .....                                                                                                                        | 80 |
| 4. Discussion .....                                                                                                                               | 81 |
| ARTICLE II: French adaptation of a film music stimulus set: Normative emotional ratings of<br>valence and arousal prompted by music excerpts..... | 93 |

|                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Introduction .....                                                                                                                                                     | 95  |
| 2. Methods.....                                                                                                                                                           | 97  |
| 2.1.Participants .....                                                                                                                                                    | 97  |
| 2.2.Material.....                                                                                                                                                         | 98  |
| 2.3.Procedure .....                                                                                                                                                       | 98  |
| 3. Results .....                                                                                                                                                          | 99  |
| 3.1.Effect of individual listeners differences on emotional judgments .....                                                                                               | 100 |
| 3.2.Effect of cultural differences on emotional judgments.....                                                                                                            | 100 |
| 4. Discussion .....                                                                                                                                                       | 100 |
| ARTICLE III: Do emotional valence and arousal modulate long-term musical memory? A comparison of patients with medial temporal lobe lesions and healthy participants..... |     |
| 1. Introduction .....                                                                                                                                                     | 114 |
| 2. Méthodologie .....                                                                                                                                                     | 119 |
| 2.1.Participants .....                                                                                                                                                    | 119 |
| 2.2.Matériel.....                                                                                                                                                         | 120 |
| 2.3.Procédure .....                                                                                                                                                       | 121 |
| 2.4.Analyse des données.....                                                                                                                                              | 122 |
| 3. Résultats .....                                                                                                                                                        | 124 |
| 3.1.Analyses préliminaires.....                                                                                                                                           | 126 |
| 3.2.Performances de reconnaissance musicale .....                                                                                                                         | 126 |
| 3.3.Jugements émotionnels musicaux.....                                                                                                                                   | 127 |
| 3.4.Analyses complémentaires .....                                                                                                                                        | 129 |
| 4. Discussion .....                                                                                                                                                       | 130 |
| ARTICLE IV: Revisiting emotion recognition in different types of temporal lobe epilepsy: the influence of facial expression intensity.....                                |     |
| 1. Introduction .....                                                                                                                                                     | 151 |
| 2. Methodology .....                                                                                                                                                      | 154 |

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1. Participants .....                                                                                                                      | 154 |
| 2.2. Material.....                                                                                                                           | 155 |
| 2.3. Procedure .....                                                                                                                         | 155 |
| 2.4. Statistical analyses .....                                                                                                              | 155 |
| 3. Results .....                                                                                                                             | 157 |
| 3.1. Comparisons between groups of HC participants and TLE patients .....                                                                    | 158 |
| 3.2. Comparisons between the three groups of patients (i.e., LTLE, MTLE-noHS, and MTLE-HS).....                                              | 161 |
| 4. Discussion .....                                                                                                                          | 165 |
| DISCUSSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES .....                                                                                                    | 183 |
| 1. L'impact de l'arousal et de la valence sur la mémoire musicale d'une population témoin<br>183                                             |     |
| 2. L'impact de l'arousal et de la valence sur la mémoire musicale d'une population clinique<br>avec une lésion du lobe temporal médian ..... | 190 |
| 3. Perspectives.....                                                                                                                         | 195 |
| Références.....                                                                                                                              | 199 |

## Résumé

De nombreuses études ont révélé un bénéfice des émotions sur le mémoire résultant en partie de l'intégrité du lobe temporal médian et notamment des connexions amygdalo-hippocampiques. Cependant, ce bénéfice a majoritairement été étudié avec des images ou des mots. Or, en tant qu'activité humaine agréable et capable de générer des émotions fortes et variées, la musique semble être un support privilégié pour explorer cette question. De plus, bien qu'une partie de la littérature ait étudié les effets des émotions sur la mémoire selon l'approche dimensionnelle (i.e., arousal et valence émotionnelle), les deux dimensions n'ont pas toujours été conjointement manipulées et leur interaction n'a été que rarement testée. Enfin, peu d'études ont modulé les délais séparant la présentation des stimuli émotionnels et les tâches de mémoire afin d'étudier l'impact des émotions sur le processus de consolidation mnésique. Pourtant, le rehaussement émotionnel de la mémoire s'accroît avec l'allongement du délai suggérant l'effet bénéfique des émotions sur le processus de consolidation. L'objectif de cette thèse est d'évaluer l'impact des dimensions émotionnelles sur la mémoire musicale et ainsi de mieux comprendre le rôle du lobe temporal dans le processus de consolidation des informations musicales en étudiant les performances de patients ayant bénéficié d'une résection du lobe temporal médian et de volontaires sains. Pour cela, nous avons testé l'impact des dimensions émotionnelles sur la mémoire musicale chez une population d'adultes sains (**Article I**). Les extraits musicaux étaient mieux reconnus après un délai de 24 heures qu'après un délai de 15 minutes, suggérant que les émotions musicales, notamment la valence positive, permettaient de renforcer la consolidation mnésique. Puis, afin de disposer d'un matériel musical générant des émotions fortes et variées, nous avons validé les jugements émotionnels associés à des extraits de musiques de films auprès de la population française (**Article II**). Ce matériel a ensuite été utilisé pour évaluer l'effet d'une lésion du lobe temporal médian sur la mémoire d'extraits musicaux (**Article III**). Un effet de la valence positive a été retrouvé sur les performances mnésiques des patients ainsi qu'un effet de l'arousal élevé, malgré la présence d'une lésion de l'amygdale. Des analyses complémentaires suggèrent que la mémoire musicale de ces patients semble relativement préservée par rapport à la mémoire verbale ou visuelle, mais uniquement lorsque le délai séparant la phase d'encodage et la phase de reconnaissance est court. Enfin, l'analyse d'une importante base de données nous a permis d'aborder les émotions sous un angle différent. En étudiant l'impact d'une épilepsie du lobe temporal sur le traitement émotionnel (**Article IV**), nous avons pu confirmer que ces patients présentaient un déficit de reconnaissance des expressions faciales émotionnelles et apporter des preuves sur l'importance de prendre en compte certaines variables cliniques dont la localisation du foyer épileptique dans les études examinant les traitements émotionnels. Ce travail a apporté de nouvelles données sur les effets de l'arousal élevé et de la valence positive sur la mémoire musicale et l'implication du lobe temporal médian dans le processus de consolidation. La poursuite de ces travaux nous permettra de mieux comprendre l'éventuel bénéfice des émotions sur la mémoire musicale de ces patients et d'envisager des prises en charge musicales auprès de cette population clinique.

**Mot clés :** émotion – mémoire - musicale – consolidation – arousal – valence

# Abstract

## Neuropsychology of emotions and musical memory in temporal lobe epilepsy

Numerous studies have revealed the benefit of emotions on memory stemming in part from the integrity of the medial temporal lobe and in particular from the amygdala-hippocampal network. However, this benefit has mostly been studied with images or words. Yet, given it is a pleasant human activity capable of generating strong and varied emotions, music seems to be a privileged medium to explore this question. Moreover, although a part of the literature has studied the effects of emotions on memory referring to the dimensional approach (i.e., arousal and emotional valence), the two dimensions have not always been jointly manipulated and their interaction has rarely been tested. Finally, few studies have modulated the delays between the presentation of emotional stimuli and memory tasks in order to study the impact of emotions on the memory consolidation process. However, the emotional enhancement of memory should increase with the lengthening of the delay suggesting the beneficial effect of emotions on the consolidation process. The objective of this thesis is to evaluate the impact of emotional dimensions on musical memory and thus to better understand the role of the temporal lobe in the consolidation process of musical information by studying the performances of patients who have undergone medial temporal lobe resection and of healthy volunteers. First, we tested the impact of emotional dimensions on musical memory in a population of healthy adults (**Article I**). Musical excerpts were better recognized after a 24-hour delay than after a 15-minute delay, suggesting that musical emotions, especially positive valence, enhanced memory consolidation. Then, in order to dispose of a musical material generating strong and varied emotions, we validated the emotional judgments associated with film music excerpts with a French population (**Article II**). This material was then used to evaluate the effect of a medial temporal lobe lesion on the memory of musical excerpts (**Article III**). An effect of positive valence was found on the patients' memory performance as well as an effect of high arousal despite the presence of an amygdala lesion in these patients. Additional analyses suggest that the musical memory of these patients seems to be relatively preserved, compared to verbal or visual memory, but only when the delay between the encoding phase and the recognition phase is short. Finally, the analysis of a large database allowed us to approach emotions from a different angle. By studying the impact of temporal lobe epilepsy on emotional treatment (**Article IV**), we were able to confirm the presence of a deficit in the recognition of emotional facial expressions in these patients and to provide evidence of the importance of taking into account certain clinical variables including the localization of the epileptic focus in studies examining emotional processing. This work has provided new data on the effects of high arousal and positive valence on musical memory and the involvement of the medial temporal lobe in the consolidation process. The continuation of this work could help us to better understand the possible benefit of emotions on the musical memory of these patients and to consider musical interventions with this clinical population.

**Keywords:** emotion – musical memory – consolidation – arousal – valence



## Préface

L'objectif de cette thèse est d'évaluer l'impact de l'arousal et de la valence émotionnelle sur la mémoire musicale et d'améliorer nos connaissances sur le rôle du lobe temporal dans le processus de consolidation des informations musicales émotionnelles en étudiant les performances de patients ayant bénéficié d'une résection du lobe temporal médian incluant l'amygdale et l'hippocampe par comparaison à des adultes sains.

La première partie de cette thèse présentera le contexte scientifique dans lequel ce travail s'inscrit. Tout d'abord, le **Chapitre I** introduira les modèles et substrats cérébraux des émotions musicales. Ensuite, le **Chapitre II** présentera notre population clinique d'intérêt, les patients atteints d'une épilepsie pharmaco-résistante du lobe temporal, et ses principaux troubles cognitifs et socio-émotionnels. Le **Chapitre III** exposera les capacités de perception et de mémoire musicales ainsi que de traitement des émotions musicales de ces patients. Enfin, le **Chapitre IV** portera sur les effets des émotions sur la mémoire en abordant les études menées dans le domaine non musical et dans le domaine musical, dans une population témoin et la population clinique d'intérêt. À l'issue de cette partie théorique, les objectifs et questions de recherche de cette thèse seront présentés.

La partie expérimentale sera composée de quatre études sous format article. Dans l'**Article I** (Nineuil et al., 2020), l'impact des dimensions émotionnelles sur la mémoire musicale, et notamment sur le processus de consolidation, sera évalué en comparant les effets de l'arousal et de la valence sur la reconnaissance d'extraits musicaux après un délai court et un délai long chez des adultes sains. L'**Article II** (Nineuil et al., 2022) présentera les normes affectives françaises d'une série d'extraits de musiques de film selon l'approche dimensionnelle des émotions. L'**Article III** (Nineuil et al., en préparation) évaluera l'effet d'une lésion du lobe temporal médian sur la mémoire à long terme d'extraits musicaux variant selon les dimensions d'arousal et de valence émotionnelle. Cette étude reprendra le paradigme de l'Article I modifié afin d'augmenter l'effet des dimensions émotionnelles sur la mémoire et utilisera les extraits musicaux de l'Article II. Enfin, dans l'**Article IV** (Nineuil et al., soumis), l'impact de l'intensité émotionnelle sur la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles chez les patients atteints d'une épilepsie du lobe temporal par rapport à des adultes sains sera évalué. L'effet de la localisation et de la latéralisation du foyer épileptique

sur la reconnaissance des expressions faciales sera également étudié, tout en contrôlant les effets des variables démographiques et cliniques.

Enfin, la section **Discussion générale et perspectives** résumera les résultats des travaux de cette thèse, et discutera de leurs implications sur les plans fondamental et appliqué.





# PARTIE THÉORIQUE



# CHAPITRE I : Modèles et substrats cérébraux des émotions musicales

Au cours de cette première partie, nous présenterons les deux modèles émotionnels les plus influents dans la littérature portant sur l'effet des émotions sur la mémoire. Nous détaillerons ensuite les principales régions cérébrales impliquées dans le traitement des émotions musicales.

## 1. Les modèles théoriques de l'émotion musicale

Une des raisons pour lesquelles nous écoutons de la musique est sa capacité à exprimer et à induire des émotions (Juslin & Västfjäll, 2008 ; Mas-Herrero et al., 2020 ; Schäfer et al., 2013). En effet, la musique est capable de communiquer des émotions de base, telles que la joie, la tristesse ou encore la peur (Peretz et al., 2010), qui sont facilement reconnues (Vieillard et al., 2008) et cela quel que soit le niveau d'éducation musicale (Bigand et al., 2005) ou la culture (Fritz et al., 2009). Ces émotions musicales peuvent être accompagnées de changements physiologiques tels qu'une variation de la température corporelle, de la conductance cutanée, du rythme cardiaque, une contraction des muscles faciaux (i.e., zygomatique ou corrugateur) (Fuentes-Sánchez, Pastor, Escrig, et al., 2021 ; Lundqvist et al., 2009) voire même un « frisson musical » (Panksepp, 1995).

Afin de mesurer les réponses émotionnelles des auditeurs lors de l'écoute musicale, deux principales approches théoriques, distinctes, mais complémentaires, sont utilisées : l'approche catégorielle et l'approche dimensionnelle.

Selon l'approche catégorielle, aussi nommée approche discrète, les émotions sont classées en un nombre défini de catégories. En travaillant sur les expressions faciales émotionnelles, Paul Ekman (1992), a montré que chaque expression était caractérisée par des traits spécifiques, les rendant universellement reconnaissable. Il a ainsi défini six émotions de base : la joie, la peur, la tristesse, la colère, la surprise et le dégoût. Tout comme les visages, la musique peut également véhiculer des émotions de base, bien que certaines comme le dégoût ou la colère n'aient pas nécessairement d'équivalent dans le domaine musical. Les catégories émotionnelles les plus souvent utilisées avec un matériel musical sont la joie, la peur, la tristesse et l'apaisement (Vieillard et al., 2008). Comme avec les expressions faciales, les émotions induites par la musique seraient modulées par des traits spécifiques. Par exemple, dans la culture occidentale, les modifications de tempo (lent ou rapide) ou encore de mode (majeur ou mineur) permettent de déclencher différentes émotions. Ainsi, la joie est souvent

caractérisée par un tempo rapide et un mode majeur tandis que la tristesse est plus fréquemment associée à un tempo lent et un mode mineur (Eerola et al., 2013 ; Gagnon & Peretz, 2003).

Selon l'approche dimensionnelle, toutes les émotions peuvent être représentées selon un nombre restreint de dimensions dont les deux principales selon Russell (1980) sont l'éveil/l'excitation (i.e., arousal en anglais, terme qui sera utilisé dans la suite de cette thèse) et la valence émotionnelle. L'arousal renvoie à un continuum qui varie de relaxant à excitant tandis que la valence varie d'agréable à désagréable ou de positif à négatif. Certains chercheurs défendent un modèle se basant sur trois dimensions : la valence, la *tension*-arousal et l'*energy*-arousal, (Schimmack & Grob, 2000). Cependant, les travaux de Eerola & Vuoskoski (2011) et de Fuentes-Sánchez, Pastor, Eerola, et al. (2021) ont montré qu'une approche dimensionnelle à deux dimensions (i.e., arousal et valence) serait suffisante pour représenter les émotions musicales perçues. Ainsi, les émotions de base pourraient être définies selon les deux dimensions émotionnelles : l'émotion de joie correspondrait plutôt à un niveau élevé d'arousal et à une valence positive alors que la peur renverrait à un niveau élevé d'arousal et à une valence négative (Russell, 1980 ; Vieillard et al., 2008). De plus, les variations de tempo influenceraient spécifiquement le jugement d'arousal alors que les variations du mode affecteraient le jugement de valence émotionnelle (Husain et al., 2002).

D'un point de vue expérimental, le paradigme classique associé à l'approche catégorielle correspond à l'appariement à choix forcé d'un stimulus émotionnel à un label verbal parmi plusieurs choix possibles. Cela repose sur l'apprentissage d'une association entre un pattern sonore et une catégorie émotionnelle. Les études s'inscrivant dans l'approche dimensionnelle se basent sur le jugement émotionnel de l'arousal et de la valence ressentis à l'aide d'échelles de Lickert variant de 4 à 9 points (Bradley & Lang, 1994).

Bien que les deux modèles soient complémentaires, l'approche dimensionnelle semblerait plus adaptée que l'approche catégorielle (Eerola & Vuoskoski, 2011 ; Fuentes-Sánchez, Pastor, Eerola, et al., 2021 ; Zentner et al., 2008). En effet, l'approche catégorielle ne semble pas rendre compte de la complexité et de la richesse du ressenti émotionnel induit par l'écoute de la musique. Par exemple, la musique catégorisée comme triste peut être jugée comme agréable si elle évoque pour l'auditeur de la compassion ou de la tendresse (Brattico et al., 2016), subtilité que l'approche catégorielle ne permet pas de considérer. Enfin, l'approche catégorielle nécessite l'utilisation d'une étiquette verbale faisant appel à des ressources cognitives non émotionnelles. Le participant doit d'abord ressentir l'émotion puis identifier

l'étiquette linguistique qui y correspond. Cependant, un individu peut avoir des difficultés à catégoriser verbalement et explicitement les émotions induites par la musique et n'avoir pourtant aucune difficulté à ressentir les émotions. A l'inverse, l'approche dimensionnelle permet au participant de se focaliser uniquement sur son ressenti émotionnel en limitant la mobilisation de ressources cognitives non émotionnelles (e.g., mémoire de travail, attention divisée). Ainsi, dans la suite de cette thèse portant sur les émotions musicales, nous avons choisi de nous référer à l'approche dimensionnelle.

## 2. Les substrats neuronaux des émotions musicales

L'expérience musicale combine des informations motrices, sensorielles, mnésiques et émotionnelles qui provoquent l'activation d'une multitude de régions dans notre cerveau. En effet, la musique ne stimule pas seulement le cortex auditif, mais également les aires motrices, les zones responsables de la mémorisation ou encore des émotions (Blood & Zatorre, 2001 ; Koelsch, 2020 ; Särkämö et al., 2013 ; Zatorre et al., 2007).

En ayant recours à des mots, des images, des goûts ou encore des odeurs, des études en neuroimagerie se référant à l'approche dimensionnelle des émotions suggèrent que le traitement de l'arousal dépendrait en grande partie de l'activation de l'amygdale tandis que celui de la valence émotionnelle impliquerait préférentiellement le cortex orbito-frontal (Anderson et al., 2003 ; Gläscher & Adolphs, 2003 ; Kensinger & Corkin, 2004 ; Small et al., 2003). Dans le domaine musical, de nombreuses études de neuroimagerie (Baumgartner et al., 2006 ; Blood & Zatorre, 2001 ; Eldar et al., 2007 ; Koelsch et al., 2006, 2008 ; Omigie et al., 2014, 2015) et de neuropsychologie (Dellacherie et al., 2008 ; Gosselin et al., 2005, 2007 ; Khalfa, Delbe, et al., 2008 ; Khalfa, Guye, et al., 2008) ont également montré l'implication de l'amygdale dans le traitement des émotions musicales. Le rôle de cette structure a été précisé par Lerner et al. (2009) dans une étude d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). En demandant aux participants de fermer leurs yeux ou de les laisser ouverts pendant l'écoute d'extraits musicaux négatifs, ces auteurs ont réussi à faire varier le niveau d'arousal ressenti des extraits musicaux. Ainsi, lorsque leurs yeux étaient fermés, les participants jugeaient les extraits comme plus arousal et l'activation de l'amygdale était plus élevée. Ces données, comme celles de Trost et al. (2015), confirment l'implication de l'amygdale dans le traitement de l'arousal dans le domaine musical, comme cela a été montré à de nombreuses reprises dans le domaine non musical.

La valence induite par l'écoute musicale a souvent été explorée à travers la manipulation du niveau de consonance et de dissonance musicale. Générée par le non-respect des règles d'harmonie musicale, la dissonance musicale induit généralement une émotion désagréable ou déplaisante, renvoyant à une valence négative, alors que la consonance provoque généralement une émotion agréable ou plaisante, correspondant à une valence positive. Ainsi, au moyen de la tomographie par émission de positons (TEP), Blood et al. (1999) ont été les premiers à explorer les réponses cérébrales en réponse à des extraits musicaux dont le degré de dissonance était modulé. Leurs résultats ont montré que l'augmentation du déplaisir induit par la dissonance musicale était associée à l'activation du cortex parahippocampique droit, structure située dans la partie antérieure et médiane du lobe temporal et présentant de fortes connexions avec l'amygdale (Y.-H. Lin et al., 2021). En revanche, l'augmentation du plaisir induit par la consonance était corrélée avec l'activation du cortex orbitofrontal bilatéral, de la région subcallosale médiale et du cortex frontopolaire droit. En utilisant un paradigme similaire dans une étude d'IRMf, Koelsch et al. (2006) ont identifié, en plus du cortex parahippocampique, l'activation de l'amygdale, de l'hippocampe et du pôle temporal en réponse à des musiques dissonantes. De plus, pour les musiques consonantes une activation accrue du gyrus frontal inférieur, de l'insula et du striatum ventral a été retrouvée. Ainsi, ces études ont révélé deux principaux réseaux d'activation variant en fonction de la valence émotionnelle du stimulus induite par la manipulation du niveau de consonance/dissonance. Une étude d'IRMf plus récente souligne également l'implication de colliculus inférieur dans le traitement de la dissonance dont le niveau d'activation serait corrélé au niveau d'aversion des individus pour la dissonance musicale (Kim et al., 2017). Enfin, en examinant les enregistrements d'électrodes intra-cérébrales, plusieurs études ont confirmé l'implication de l'amygdale et du cortex orbito-frontal ainsi que du cortex auditif dans le traitement de la consonance et de la dissonance musicale (Dellacherie et al., 2009 ; Omigie et al., 2014, 2015). De plus, ces enregistrements, permettant d'évaluer la séquence d'activation de différentes régions cérébrales, ont également permis d'identifier que l'amygdale réagissait en premier et de manière très rapide à des stimuli émotionnels et qu'elle modulait les réponses des cortex orbitofrontaux et auditifs (Omigie et al., 2014). L'amygdale se révèle donc être une structure pivot au sein du réseau de traitement des émotions musicales.

Un autre phénomène étudié dans le domaine musical et nous apportant des précisions sur les substrats cérébraux des émotions est l'expérience du frisson musical (Panksepp, 1995). Ce frisson correspond à une expérience brève et intense s'accompagnant d'une augmentation

de la réponse électrodermale et du rythme cardiaque (Grewe et al., 2009). Il pourrait être le signe d'une émotion d'arousal élevé et de valence positive. La première étude à avoir exploré les bases cérébrales à l'origine de ce phénomène est celle de Blood & Zatorre (2001) menée à l'aide d'une TEP. Les activations cérébrales en réponse à l'écoute de musiques provoquant un frisson musical ont été comparées à celles en réponse à des musiques n'en provoquant pas. Les auteurs ont observé lors d'un frisson une augmentation du débit sanguin cérébral au niveau de l'insula, du cortex orbito-frontal, du cortex cingulaire antérieur, du thalamus et en particulier du striatum ventral, contenant le noyau accumbens, ainsi qu'une diminution de l'activation de l'amygdale, de l'hippocampe et du cortex préfrontal ventromédian. Or, le striatum ventral, l'insula et le cortex orbitofrontal sont des structures impliquées dans le système de récompense et du plaisir. En effet, ces zones sont également activées lors de la consommation de nourriture, de drogue ou encore face à des stimuli sexuels (Breiter et al., 1997 ; Sescousse et al., 2013 ; Small et al., 2001). Ces résultats, confirmés par d'autres études (Brown et al., 2004 ; Menon & Levitin, 2005), suggèrent donc que la musique, même si elle n'a aucune ressemblance fonctionnelle avec les stimuli gratifiants ou aucune valeur biologique démontrée, activerait le circuit cérébral lié au plaisir (Blood & Zatorre, 2001 ; Gold et al., 2019 ; Koelsch, 2014 ; Mas-Herrero et al., 2018, 2021 ; Salimpoor et al., 2011, 2013). De plus, ces études confirmeraient l'implication du cortex préfrontal en interaction avec des structures sous-corticales dans le traitement de la valence émotionnelle dans le domaine musical, implication largement démontrée dans le domaine non musical.

En résumé, le traitement des émotions musicales impliquerait un réseau cortical et sous-cortical dont la complexité peut être due à la richesse des émotions pouvant être induites par la musique (Koelsch, 2018, 2020 ; Trost et al., 2012 ; Vuilleumier & Trost, 2015). La majorité des études s'accordent sur l'importance du lobe temporal, notamment de l'amygdale, et du lobe frontal dans ce réseau. Notons d'ailleurs un recouvrement, au moins partiel, entre ce réseau émotionnel et le réseau sur lequel repose la mémoire (Carlesimo, 2022 ; Yonelinas & Ritchey, 2015). Or, les lobes temporaux et frontaux seraient fréquemment impliqués dans les réseaux épileptogènes. Une crise d'épilepsie d'origine temporale peut se propager, via les connexions temporo-frontales, vers les régions frontales et provoquer ainsi des déficits des capacités cognitives associées à ces régions (J. J. Lin et al., 2008). Comme nous le discuterons dans le chapitre suivant, l'épilepsie du lobe temporal constitue donc un modèle pertinent pour l'étude des émotions musicales.



## CHAPITRE II : Épilepsie pharmaco-résistante du lobe temporal, un modèle neuropathologique pour l'étude de la mémoire et des émotions

Dans cette seconde partie, des définitions de l'épilepsie et des données épidémiologiques seront présentées pour ensuite aborder la présentation de la population clinique d'intérêt : les patients atteints d'une épilepsie pharmaco-résistante du lobe temporal. Les principaux troubles cognitifs, émotionnels et les déficits de cognition sociale seront décrits. Enfin, les différentes techniques de chirurgie de l'épilepsie du lobe temporal et leurs impacts cliniques et cognitifs seront exposés.

### 1. Épilepsie pharmaco-résistante

#### 1.1. Définition et données épidémiologiques

L'épilepsie est l'une des pathologies neurologiques les plus fréquentes, touchant environ 650 000 patients en France. La prévalence de l'épilepsie est comprise entre 0,5% et 0,8% de la population (Fondation Française pour la Recherche sur l'Epilepsie, 2022). Cette pathologie est caractérisée par une prédisposition du cerveau à générer des crises, c'est-à-dire des manifestations transitoires de signes et/ou de symptômes dues à une activité neuronale excessive ou synchrone anormale dans le cerveau (Fisher et al., 2005). Selon la Ligue Internationale contre l'Épilepsie (*International League Against Epilepsy*, ILAE), le diagnostic d'épilepsie est établi lorsqu'au moins une des conditions suivantes est remplie : (1) au moins deux crises non provoquées (ou réflexes) surviennent dans un laps de temps de plus de 24 heures d'intervalle, (2) une crise non provoquée (ou réflexe) survient et la probabilité de nouvelles crises est similaire au risque de récurrence générale après deux crises non provoquées (au moins 60 %) au cours des dix prochaines années, (3) le diagnostic d'un syndrome épileptique (Fisher et al., 2014).

Dans 70% à 80% des cas, les médicaments antiépileptiques, prescrits en monothérapie ou en polythérapie, permettent de contrôler totalement les crises (Fondation Française pour la Recherche sur l'Épilepsie, 2022). En revanche, dans les 20% à 30% des cas restants, malgré une prise régulière du traitement et une polythérapie, les crises persistent. Après l'échec de deux essais de traitement pharmacologique antiépileptique, le diagnostic de la pharmaco-résistance de l'épilepsie est retenu (Kwan et al., 2009). En revanche, l'épilepsie est considérée comme résolue pour les patients s'ils ont présenté un syndrome épileptique âge-dépendant mais

ont maintenant dépassé l'âge applicable à ce syndrome ou s'ils sont restés sans crise les dix dernières années et sans traitement pharmacologique antiépileptique pendant au moins les cinq dernières années (Fisher et al., 2014).

## 1.2. Classifications

En 2017, l'ILAE a proposé une nouvelle classification des épilepsies distinguant quatre catégories : les épilepsies généralisées, les épilepsies focales, les épilepsies généralisées et focales combinées et les épilepsies non déterminées (Scheffer et al., 2017). Les épilepsies généralisées sont caractérisées par des manifestations cliniques et électroencéphalographiques (EEG) indiquant l'implication initiale des deux hémisphères cérébraux tandis que les épilepsies focales renvoient à des crises dont l'origine est circonscrite, au moins initialement, à un seul hémisphère cérébral et le plus souvent au sein d'un lobe cérébral en particulier. Ainsi, parmi les épilepsies focales on distingue, les épilepsies frontales, temporales, pariétales et occipitales. La catégorie des épilepsies généralisées et focales combinées correspond donc aux patients qui présentent à la fois des crises généralisées et des crises focales. Enfin, la dernière catégorie correspond aux épilepsies pour lesquelles il n'y a pas suffisamment d'information clinique et EEG disponibles pour en déterminer le type. Dans le cadre de cette thèse, nous nous concentrerons sur les épilepsies focales touchant le lobe temporal.

## 1.3. Épilepsie du lobe temporal

L'épilepsie du lobe temporal (LT) est la forme la plus courante des épilepsies pharmaco-résistantes. Elle est caractérisée par des décharges épileptogènes provenant des structures du LT, comme l'hippocampe, l'amygdale, le cortex entorhinal ou encore le subiculum. Cependant, le processus pathologique ne se limiterait pas au foyer épileptique, mais impliquerait la perturbation du réseau comprenant la formation hippocampique et ses circuits fonctionnels (i.e., lobe temporal antérieur et latéral, insula, thalamus, gyrus cingulaire et cortex préfrontal) (Bertram, 2009). Les symptômes les plus fréquents sont une sensation épigastrique ascendante souvent décrite comme une nausée, des états de conscience altérée, des « auras affectives » comprenant la peur, des flashbacks, des déjà-vu, des états mentaux de rêve, des illusions et des hallucinations auditives et visuelles (Blair, 2012).

L'ILAE décrit deux principaux types d'épilepsie du LT : l'épilepsie du lobe temporal médian (LTM), type le plus fréquent, et l'épilepsie du lobe temporal latéral (LTL). Le LTM inclut l'hippocampe, le gyrus denté, le complexe subiculaire, l'amygdale, le fornix et les cortex

entorhinal, périrhinal et parahippocampique. Le LTL comprend le néocortex de la face latérale et de la base du lobe temporal.

### 1.3.1. Épilepsie du lobe temporal médian avec ou sans sclérose hippocampique

La sclérose hippocampique (SH) est caractérisée par une perte neuronale et une gliose (i.e., prolifération de cellules gliales) au niveau de l'hippocampe (Blümcke et al., 2013). Elle représente l'étiologie la plus fréquente chez les patients touchés par une épilepsie du LTM. En effet, l'analyse histologique après résection chirurgicale des tissus cérébraux chez 6 847 patients présentant une épilepsie du LT a révélé la présence d'une SH chez 54.4% des patients (Blumcke et al., 2017). Des antécédents de convulsions fébriles sont observés chez environ 56% des patients opérés pour une SH (Calderon-Garcidueñas et al., 2018). La raison pour laquelle des enfants développent des convulsions fébriles et pour laquelle certains développent ensuite une épilepsie du LT avec SH reste encore mal comprise.

D'autres pathologies peuvent être associées à l'épilepsie du LTM comme des tumeurs neuroépithéliales dysembryoplasiques (i.e., DNET), des cavernomes, des kystes ou encore des dysplasies, mais celles-ci restent moins étudiées (Phuong et al., 2020).

### 1.3.2. Épilepsie du lobe temporal latéral

La distinction entre les épilepsies du LTM et les épilepsies du LTL repose principalement sur les caractéristiques spécifiques des crises et le contexte étiologique. Les crises provoquées par une épilepsie du LTL sont caractérisées par des auras auditives, des crises aphasiques et une forte tendance à la généralisation (Bercovici et al., 2012 ; Michelucci et al., 2009). Les patients atteints d'une épilepsie du LTL ne représentent qu'une minorité, environ 10%, de toutes les épilepsies temporales (Williamson & Engel, 2008).

## 2. Neuropsychologie de l'épilepsie pharmaco-résistante du lobe temporal

Les dysfonctionnements neuropsychologiques sont fréquents dans l'épilepsie du LT et touchent un large éventail de troubles cognitifs, psychologiques et émotionnels ayant de lourdes conséquences sur le quotidien et la qualité de vie des patients (Allone et al., 2017 ; Bora & Meletti, 2016 ; Hermann et al., 2008 ; Kotwas et al., 2017). De plus, les troubles cognitifs associés à ce type d'épilepsie sont très variables. Aux effets de l'âge, du niveau d'étude et du milieu socioculturel retrouvés dans la population générale s'ajoutent les effets propres à l'épilepsie tels que l'âge de début des crises ou la durée de la maladie (Cheung et al.,

2006 ; Kaaden & Helmstaedter, 2009 ; Lespinet et al., 2002), la fréquence des crises (Dodrill, 2004), le nombre d'antiépileptiques (Jokeit et al., 2005 ; Kwan & Brodie, 2001) ou encore la latéralisation et la localisation de la lésion épileptique (Baxendale et al., 2010).

## 2.1. Troubles cognitifs

Les troubles de la mémoire épisodique représentent la comorbidité cognitive la plus fréquente chez les patients atteints d'une épilepsie du LT, c'est pourquoi la majorité des études en neuropsychologie s'est concentrée sur cette fonction cognitive. Cependant, plusieurs études ont révélé la présence d'autres altérations touchant, entre autres, les fonctions intellectuelles (Baxendale et al., 2010), exécutives (Diao et al., 2015 ; Keller et al., 2009) ou encore langagières (Bonelli et al., 2011 ; Kucukboyaci et al., 2014) (pour revue, Allone et al., 2017 ; Zhao et al., 2014). Compte tenu du rôle du LT et des structures médianes dans la mémoire épisodique (Milner, 1972), il n'est pas surprenant qu'une épilepsie du LT provoque des troubles de la mémoire. En revanche, les déficits touchant les autres sphères de la cognition ne peuvent pas être expliqués par les lésions cérébrales spécifiques, mais reflètent plutôt une maladie du réseau structurel (Keller & Roberts, 2008 ; Vaughan et al., 2016).

Les troubles de la mémoire épisodique retrouvés lors d'une épilepsie du LT peuvent être massifs ou plus discrets. Dans certains cas, un oubli rapide est rapporté, après seulement 20 à 30 minutes, alors que dans d'autres cas, les patients semblent retenir normalement des informations sur des périodes relativement brèves, mais un taux d'oubli accéléré sur des jours voire des semaines (Cassel et al., 2016 ; Mayes et al., 2019 ; Tramon-Negre et al., 2017). En effet, certaines études ont relevé des taux d'oubli plus élevés après de longues périodes qu'après de courtes périodes (Muhlert et al., 2011 ; Wilkinson et al., 2012). Ce phénomène, connu sous les termes d'oubli à long terme accéléré, suggère la présence d'un déficit de consolidation de la mémoire à long terme chez les patients présentant une épilepsie du LT (Mameniškienė et al., 2020 ; Tramon-Negre et al., 2017). De plus, ce déficit de consolidation à long terme serait plus fréquemment observé lors d'une épilepsie touchant le LTM que le LTL, confirmant l'implication des structures du LTM dans la consolidation mnésique (Helmstaedter et al., 1997).

Selon la théorie des troubles de la mémoire spécifique au matériel (Milner, 1966, 1972), la latéralisation cérébrale de la lésion épileptique affecterait différemment les performances mnésiques. Cependant, alors que de multiples études ont relevé un déficit de la mémoire épisodique verbale suite à une lésion du LT dominant pour le langage, il existe moins de

preuves de l'association inverse entre le LT non dominant et la mémoire épisodique non verbale (Glikmann-Johnston et al., 2008 ; Jeyaraj et al., 2013 ; Lancelot et al., 2005). De plus, des déficits de la mémoire verbale et non verbale peuvent être retrouvés à la fois lors de lésions du LT droit ou gauche (Ono et al., 2019). Ces données remettent donc en question l'existence de trouble de la mémoire spécifique au matériel en présence d'une épilepsie du LT unilatérale.

## 2.2. Troubles de l'humeur

Alors que la littérature s'était concentrée sur les troubles cognitifs liés à l'épilepsie du LT, plus récemment des études ont mis en avant la présence fréquente de troubles de l'humeur, aujourd'hui reconnus comme des comorbidités associées à l'épilepsie (Kanner, 2016 ; Kotwas et al., 2017 ; Tellez-Zenteno et al., 2007). En effet, la prévalence de la dépression et de l'anxiété serait plus élevée chez les personnes présentant une épilepsie que chez les personnes n'en présentant pas (Rayner et al., 2016). Ainsi, près d'un tiers de ces personnes souffriraient de dépression et d'anxiété, ce qui correspond à la prévalence de l'épilepsie pharmaco-résistante (Kwon & Park, 2014). L'association des troubles dépressifs à l'épilepsie du LT (Garcia, 2012) pourrait s'expliquer par le fait que les perturbations de l'humeur seraient liées aux dysfonctionnements des structures temporales mésiales, en particulier l'amygdale et l'hippocampe (Hixson & Kirsch, 2009). Selon certains auteurs, ces troubles impacteraient considérablement la qualité de vie des patients, peut-être même plus que les crises d'épilepsie (Boylan et al., 2004 ; Lima et al., 2021).

Plusieurs études ont également montré que les scores de dépression seraient corrélés aux plaintes subjectives de la mémoire en présence d'une épilepsie du LT (Hoppe et al., 2007). Les plaintes de mémoire pourraient donc cacher des troubles émotionnels qui sont souvent sous-diagnostiqués et considérés probablement à tort comme secondaires aux crises ou aux antiépileptiques (Samson & Denos, 2022).

## 2.3. Troubles de la cognition sociale

Les troubles de la cognition sociale ont fait l'objet d'un intérêt grandissant dans le domaine de l'épilepsie du LT au cours de la dernière décennie (Mirabel et al., 2020). La cognition sociale renvoie à un ensemble de compétences émotionnelles permettant de réguler les relations entre les individus. Certaines de ces compétences seraient préservées chez les patients présentant une épilepsie du LT (e.g., empathie, capacités d'adhésion aux règles morales et conventionnelles) alors que d'autres seraient déficitaires (e.g., théorie de l'esprit,

reconnaissance des émotions), soulignant des performances hétérogènes au sein de cette même fonction (Giovagnoli et al., 2021).

La majorité des études dans ce domaine a porté la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles (EFE). Chez les patients présentant une épilepsie du LT, la reconnaissance des EFE serait altérée (Edwards et al., 2017 ; Monti & Meletti, 2015). Selon certains auteurs, ce déficit toucherait principalement des expressions faciales de valence négative (e.g., Bonora et al., 2011 ; Gomez-Ibañez et al., 2014 ; Hennion et al., 2015 ; Meletti et al., 2009 ; Tanaka et al., 2013). Cependant, la nature des expressions émotionnelles affectées dans l'épilepsie du LT reste à l'heure actuelle largement controversée. De plus, l'influence des caractéristiques cliniques liées à l'épilepsie, telles que l'âge de début de l'épilepsie, le nombre d'antiépileptiques ou encore la fréquence des crises sur les capacités de reconnaissance des EFE, n'est pas clairement identifiée. Quelques études ont montré que les difficultés de reconnaissance des EFE étaient souvent associées à un début précoce de l'épilepsie (Bonora et al., 2011 ; Meletti et al., 2003, 2009) ou à un nombre élevé d'antiépileptiques (Hlobil et al., 2008), mais ces résultats restent débattus.

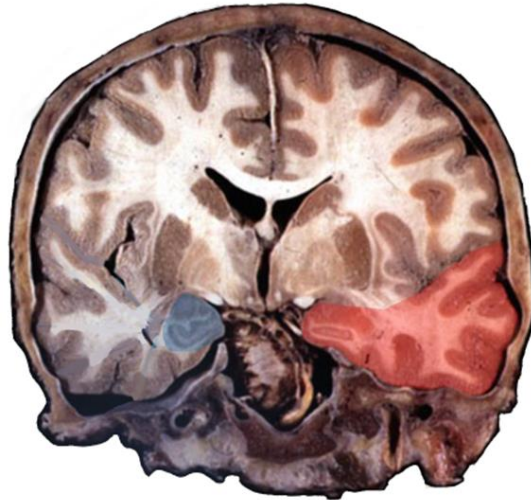
Compte tenu de l'importance de la compréhension et de la reconnaissance des émotions exprimées par autrui dans la communication sociale, ces troubles pourraient avoir un impact important sur la vie sociale des patients justifiant pleinement d'intégrer l'évaluation de ces compétences dans la prise en charge neuropsychologique de l'épilepsie (Steiger & Jokeit, 2017).

### 3. Traitement chirurgical de l'épilepsie pharmaco-résistante du lobe temporal

#### 3.1. Les différentes techniques de chirurgie

Plusieurs voies d'abord chirurgicales sont possibles pour traiter l'épilepsie du LT. Dans le cadre de notre travail, nous présenterons plus particulièrement la lobectomie temporale antérieure et l'amygdalo-hippocampectomie sélective qui sont les interventions les plus fréquemment réalisées (Mathon & Clemenceau, 2022). Dans la lobectomie temporale antérieure, la résection comprend les structures mésiales du lobe temporal incluant l'amygdale, l'hippocampe, les cortex avoisinants (i.e., entorhinal, périrhinal et parahippocampique) ainsi que le pôle temporal (voir **Figure 1**). En revanche, l'amygdalo-hippocampectomie sélective est une chirurgie sélective limitée aux structures mésiales du lobe temporal et donc préservant le pôle temporal. L'approche chirurgicale choisie est déterminée selon le profil clinique et

physiopathologique de chaque patient. L'objectif de cette approche thérapeutique vise à supprimer les crises tout en limitant les risques d'aggravation cognitive et comportementale liés à l'intervention chirurgicale.



**Figure 1.** Approches chirurgicales de l'épilepsie pharmaco-résistante du lobe temporal

Les zones cérébrales colorées illustrent l'étendue des résections d'une amygdalo-hippocampectomie sélective (en bleu) et d'une lobectomie temporale antérieure (en rouge) (adaptée de Mathon & Clemenceau (2022)).

### 3.2. L'impact de la chirurgie

Le déclin de la mémoire épisodique serait une des conséquences les plus fréquentes du traitement chirurgical de l'épilepsie du LT (Lee et al., 2002). Les autres principales conséquences de ce traitement sont un déclin langagier qui peut être retrouvé après une résection touchant l'hémisphère dominant pour le langage (Busch et al., 2016 ; Ives-Deliperi & Butler, 2012 ; Sherman et al., 2011) ou encore l'apparition ou l'aggravation de troubles de l'humeur (Cleary et al., 2013). Ces risques de déficits postopératoires dépendraient de nombreux facteurs tels que la localisation et la latéralisation de la lésion, l'âge du patient, l'âge d'apparition des crises, leurs fréquences ou encore les traitements (Elger et al., 2004 ; Sherman et al., 2011). Ainsi, en fonction du profil neuropsychologique pré-chirurgical et des facteurs liés à l'épilepsie comme l'étendue de la résection, ces risques postopératoires peuvent être anticipés.

Selon Chelune (1995), l'évaluation des risques de déclin mnésique dans le cadre de la chirurgie de l'épilepsie du LTM avec SH reposerait sur deux hypothèses complémentaires. La première, s'inscrivant dans la continuité des travaux de Penfield & Milner (1958), renvoie à la

réserve fonctionnelle des régions du LTM controlatérales à la résection chirurgicale. Selon cette hypothèse, les capacités mnésiques postopératoires seraient déterminées par l'intégrité fonctionnelle des structures controlésionnelles grâce à des mécanismes compensatoires. La deuxième hypothèse fait référence à la notion d'adéquation fonctionnelle des régions du LTM ipsilatérales à la résection chirurgicale. Ainsi, le degré de déficit mnésique postopératoire serait déterminé par la réserve fonctionnelle des régions cérébrales controlatérales à la lésion ainsi que par la capacité résiduelle du tissu cérébral lésé avant la chirurgie. Conformément à cette seconde hypothèse, les patients présentant une épilepsie du LTM avec SH et des performances mnésiques basses avant la chirurgie ont tendance à présenter un déclin mnésique moins important que les patients dont les fonctions hippocampiques sont relativement épargnées et dont les performances mnésiques sont bonnes, et ce quelle que soit la latéralisation de la SH (Baxendale et al., 2013 ; LoGalbo et al., 2005 ; Witt et al., 2015).

Bien qu'une diminution des capacités mnésiques soit souvent retrouvée chez les patients ayant bénéficié d'une chirurgie du LT (Baxendale et al., 2013 ; Mathon et al., 2017), il existe une variabilité individuelle importante au niveau de l'importance, de la nature et de la direction des modifications mnésiques postopératoires (Baxendale & Thompson, 2005). Ainsi, des déficits de la mémoire déjà présents avant la chirurgie peuvent s'accroître après l'opération (Sherman et al., 2011 ; Witt et al., 2015), ce cas de figure représentant environ 30% des cas (Baxendale & Thompson, 2018). Au contraire, les capacités mnésiques s'amélioreraient chez 10 à 20% des patients opérés et enfin la majorité resterait stable (Baxendale & Thompson, 2005, 2018 ; Khalil et al., 2016). Cette stabilisation ou amélioration des performances pourrait être liée à la disparition des crises et donc au désengagement de la zone épileptogène, à la diminution du traitement antiépileptique, à la présence ou non d'une lésion pré-chirurgicale ou encore dépendrait de l'étiologie de l'épilepsie. Par ailleurs, Thivard et al. (2007) ont mis en évidence que des anomalies de diffusion retrouvées bilatéralement au niveau du LTM en phase préopératoire n'étaient plus retrouvées lors du suivi postopératoire. Ce résultat suggère que l'activité épileptogène générée par le LTM pourrait se propager et perturber l'activation de l'hippocampe controlatéral, cependant, cette perturbation serait réversible. En effet, après la chirurgie, l'hippocampe controlatéral pourrait fonctionner de nouveau de manière normale et donc compenser la perte de l'autre hippocampe.

En conclusion, compte tenu de la présence des régions essentielles pour les fonctions mnésiques et émotionnelles au sein des structures médianes du LT mais aussi des aires

primordiales à la fonction auditive dans les régions latérales du LT, l'épilepsie pharmaco-résistante du LT représente un modèle pathologique idéal pour améliorer nos connaissances concernant le traitement des émotions et leur impact sur la mémoire musicale.



## CHAPITRE III : Musique et épilepsie

**Clémence Nineuil<sup>1</sup> et Séverine Samson<sup>1,2</sup>**

1. Univ. Lille, ULR 4072 - PSITEC - Psychologie : Interactions Temps Émotions Cognition, F-59000 Lille, France
2. Unité d'épileptologie, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris, GHU La Pitié Salpêtrière—Charles Foix, Paris

Chapitre déposé pour l'ouvrage intitulé « *Musique et Santé* »

édité par G. Mick et E. Bigand

## 1. Introduction

Nos connaissances concernant les bases neurobiologiques de la cognition et des émotions musicales ont largement bénéficié de l'observation de patients souffrant de lésions cérébrales, et notamment des patients épileptiques. Les modifications fonctionnelles du cerveau liées à l'épilepsie, les différents tableaux cliniques engendrés par cette maladie et les prises en charge thérapeutiques de ces patients ont conduit de nombreux chercheurs et cliniciens à examiner les relations entre le cerveau et le comportement dans ce contexte. Ces recherches cliniques ont fait de l'épilepsie un modèle neuropathologique approprié pour étudier divers dysfonctionnements cognitifs, incluant la cognition et les émotions musicales.

L'épilepsie est une maladie neurologique caractérisée par une prédisposition à générer des crises (Berg et al., 2010 ; Fisher et al., 2014). Les crises d'épilepsie résultent d'une activité neuronale anormale, hypersynchrone et transitoire du cerveau. Décrits depuis longtemps, les liens entre épilepsie et musique ont été discutés dans différents contextes cliniques (pour revue, Maguire, 2012). Les premiers travaux rapportés dans la littérature ont porté sur une forme rare d'épilepsie du lobe temporal qui se caractérise par des crises ayant la particularité d'être déclenchées par la musique. Ces crises d'épilepsie dites musicogéniques suggèrent l'existence de zones cérébrales sensibles à des stimuli musicaux particuliers (Critchley, 1937). Toutefois, le mécanisme neurobiologique responsable de ce tableau clinique reste mal connu. Dans d'autres formes d'épilepsie du lobe temporal, des symptômes relatifs à la musique peuvent se manifester durant la crise. Dans le cas d'une symptomatologie positive (i.e., l'apparition de signes cliniques), des hallucinations musicales, une musicophilie, un chant ou un sifflement peuvent être déclenchés par la crise. À l'inverse, une symptomatologie négative (i.e., dégradation des capacités habituelles) peut se traduire par une aprosodie et une amusie ictale. Étant donné que ces phénomènes auditifs ne sont pas systématiquement recherchés par les cliniciens et que les patients ne pensent pas à les signaler, ignorant leurs relations possibles avec l'épilepsie, ces épilepsies sont rarement détectées. Elles sont, de ce fait, peu étudiées et leur fréquence exacte reste difficile à estimer. Ainsi, la majorité des recherches portant sur les liens entre musique et épilepsie a porté sur l'étude des capacités musicales chez des personnes, généralement sans expérience musicale particulière, souffrant d'épilepsie du lobe temporal ou du lobe frontal (pour revue, Samson, 1999 ; Stewart et al., 2006). C'est dans ce contexte clinique qu'ont été réalisés les travaux concernant les fondements neurobiologiques de la fonction musicale présentés dans ce chapitre.

Après une brève présentation de l'épilepsie et de ses particularités, nous exposerons les études qui nous ont éclairés sur les bases cérébrales de la perception, de la mémoire et des émotions musicales. L'objectif n'est pas de dresser une liste exhaustive des études dans ce domaine, mais de présenter quelques résultats marquants. Puis, l'idée que la pratique musicale pourrait moduler l'impact d'une lésion cérébrale, et notamment d'origine épileptique, sur les fonctions cognitives sera examinée au regard des travaux portant sur la plasticité cérébrale. Nous terminerons ce chapitre en discutant l'hypothèse d'un effet neuroprotecteur de la pratique musicale contre les séquelles cognitives et émotionnelles de certaines maladies neurologiques offrant des perspectives cliniques prometteuses pour améliorer la prise en charge d'un large spectre de patients.

## 2. L'épilepsie et ses particularités

Dans la majorité des cas, les crises d'épilepsie sont bien contrôlées par un traitement pharmacologique. Toutefois, une minorité d'entre eux (i.e., environ 30%) souffrent d'une épilepsie qui ne répond pas efficacement aux médicaments. Ces épilepsies, dites pharmaco-résistantes ou réfractaires aux médicaments (Kwan et al., 2009), sont remarquablement améliorées par un traitement chirurgical. Celui-ci consiste à enlever le foyer épileptogène correspondant à la région cérébrale responsable des crises d'épilepsie. Cependant, cette approche thérapeutique ne peut être proposée qu'à condition que le foyer épileptogène soit clairement identifié et que la chirurgie ne comporte aucun risque fonctionnel pour le patient (Samson, 2014 ; Samson & Denos, 2022).

Parmi les épilepsies résistantes aux médicaments, l'épilepsie du lobe temporal est de loin la plus courante, suivie par l'épilepsie du lobe frontal. C'est pourquoi les études publiées dans ce domaine portent essentiellement sur l'épilepsie du lobe temporal. De plus, la présence dans le lobe temporal d'aires cérébrales dédiées à la mémoire et aux émotions, mais aussi de zones spécialisées dans le traitement de l'information auditive, justifie pleinement l'approche scientifique proposée ici. Au niveau anatomique, le lobe temporal comprend dans sa partie interne l'hippocampe et ses cortex avoisinants nécessaires au bon fonctionnement de la mémoire (Ranganath & Ritchey, 2012) ainsi que l'amygdale connue pour son rôle dans les émotions (Phelps & LeDoux, 2005). Dans sa partie latérale se trouvent les aires perceptives auditives (i.e., cortex auditif primaire et aires associatives) au niveau du cortex temporal supérieur et les aires perceptives visuelles (i.e., voie ventrale ou occipito-temporale) au niveau du cortex temporal inférieur. Compte tenu de la présence très fréquente d'une atteinte de

l'hippocampe (i.e., sclérose hippocampique) dans l'épilepsie pharmaco-résistante, les difficultés de mémoire sont au premier plan (pour revue, Allone et al., 2017). Selon l'étendue du dysfonctionnement cérébral, des déficits émotionnels (pour revue, Monti & Meletti, 2015) et perceptifs (pour revue, Grant, 2005) peuvent également être associés à l'épilepsie.

Grâce à l'apport de l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) structurale, il est possible à l'heure actuelle de mesurer avec précision l'étendue de la lésion cérébrale et d'examiner les liens entre le volume estimé des structures touchées et les performances musicales des patients. L'approche généralement adoptée consiste à comparer les scores à une tâche musicale de personnes présentant une lésion unilatérale du lobe temporal (droit ou gauche) d'origine épileptique à celles de personnes saines (témoins appariés) sur le plan neurologique, mais comparables en termes d'âge, de sexe, de scolarité, et d'expertise musicale. Aucune personne impliquée dans ces études ne présente de déficience intellectuelle ou de trouble psychiatrique. Les fonctions du langage sont représentées de manière prédominante dans l'hémisphère cérébral gauche. D'une manière générale, ces personnes présentent l'avantage d'être jeunes (moyenne d'âge 35 ans) et ne souffrent d'aucun déficit neurologique additionnel (hémiplégie, aphasie ou hémianopsie), à la différence des sujets porteurs de lésions vasculaire ou neurodégénérative. C'est dans le contexte de l'évaluation neuropsychologique pré- et post-chirurgicale des patients présentant une épilepsie pharmaco-résistante que les études sur la fonction musicale rapportées ici ont été réalisées.

### 3. La perception musicale

Comme évoqué précédemment, une particularité importante du cortex temporal est qu'il traite les informations sensorielles, son organisation fonctionnelle étant déterminée par la modalité auditive ou visuelle des signaux. Son implication dans la fonction auditive a été initialement démontrée par les études de stimulations corticales réalisées durant la chirurgie de l'épilepsie (Penfield & Jasper, 1954 ; Penfield & Perot, 1963). Avant le développement de l'imagerie cérébrale, les neurochirurgiens identifiaient les structures anatomiques à partir de la stimulation électrique du cortex cérébral durant l'intervention chirurgicale. Ce repérage anatomique reposant sur les liens entre une stimulation corticale et une modification comportementale permettait de localiser les structures anatomiques avant de procéder à la résection chirurgicale. Le cerveau n'ayant pas de nocicepteurs (i.e., de récepteurs sensoriels à la douleur), le patient ne ressentait aucune douleur. Wilder Penfield de l'Institut Neurologique de Montréal et ses collègues ont ainsi découvert que des expériences auditives complexes telles

que l'écoute de voix, de musique ou de bruit de l'environnement étaient associées aux stimulations électriques des aires auditives associatives (i.e., partie latérale et supérieure du lobe temporal) alors que des sensations plus grossières étaient provoquées par la stimulation de l'aire auditive primaire (i.e., gyrus transverse de Heschl). Ces observations démontrent l'implication différente des aires auditives primaires et associatives dans le traitement auditif et témoignent également de l'origine cérébrale des hallucinations auditives. Toutefois, les sensations musicales étaient plus souvent rapportées après la stimulation du lobe temporal droit qu'après la stimulation du lobe temporal gauche suggérant l'existence d'une asymétrie cérébrale en faveur de l'hémisphère droit pour la fonction musicale (Penfield & Perot, 1963). Cette asymétrie est comparable à celle bien connue des aires corticales auditives du lobe temporal gauche pour l'analyse des sons du langage (pour revue, Friederici, 2011).

Une série d'études a par la suite été réalisée chez des patients ayant bénéficié d'un traitement chirurgical pour soigner leur épilepsie pharmaco-résistante venant alors étoffer ces premières observations (pour revue, Samson, 1999 ; Stewart et al., 2006). Plusieurs recherches ont montré que les patients avec une lésion du cortex temporal droit présentaient des difficultés de perception musicale. Lorsque la lésion touchait le cortex auditif primaire droit, la perception de la hauteur des sons complexes périodiques (e.g., perception de la fréquence fondamentale manquante) était altérée démontrant le rôle spécifique du cortex auditif droit dans l'intégration spectrale (Zatorre, 1988). La prédominance du lobe temporal droit sur le lobe temporal gauche a également été mise en évidence dans les tâches de discrimination du timbre (Milner, 1962 ; Samson et al., 2002 ; Samson & Zatorre, 1994), du rythme musical (Liégeois-Chauvel, 1998) ou d'intervalles de hauteur (Johnsrude et al., 2000 ; Samson & Zatorre, 1988, 1991 ; Zatorre, 1985). Une analyse comparant l'étendue de la chirurgie qui pouvait inclure ou non l'aire auditive primaire a montré que les patients qui avaient bénéficié d'une chirurgie du lobe temporal droit, et ceux qui avaient eu une chirurgie à gauche incluant l'aire auditive primaire, étaient déficitaires par rapport aux témoins dans ces tâches de discrimination mélodique (Johnsrude et al., 2000 ; Samson & Zatorre, 1988 ; Zatorre, 1985). Seuls, les patients ayant subi une chirurgie qui se limitait aux aires associatives de la portion antérieure du lobe temporal gauche réussissaient ces épreuves. À la lumière de ces résultats, il apparaît que le côté de la chirurgie, mais également la résection d'une partie du cortex auditif primaire ont vraisemblablement des effets indépendants, mais additifs sur la perception musicale.

Toutefois, la perception musicale n'est pas une fonction qui dépendrait exclusivement du lobe temporal droit. L'implication prédominante du lobe temporal gauche dans certaines tâches musicales évaluant la perception auditive de variations temporelles rapides (i.e.,  $< 30$  ms), telle que la détection d'un décalage temporel dans une séquence régulière ou isochrone (Ehrle et al., 2001) ou dans une chanson (Samson et al., 2001) a également été mise en évidence chez des patients épileptiques. Les résultats ont montré un déficit systématique du traitement temporel rapide dans des tâches musicales en présence d'une lésion du lobe temporal gauche, déficit qui ne se manifestait pas en présence d'une lésion comparable à droite. Ces données ont permis de confirmer dans le domaine musical des résultats précédemment rapportés dans le domaine verbal (Efron, 1963 ; Tallal et al., 1993) et de documenter l'existence de troubles de la perception temporelle rapide chez des patients ne présentant pas de troubles importants au niveau du langage (e.g., aphasie, dyslexie). À l'inverse, les résultats obtenus dans d'autres études ont démontré le rôle prédominant du lobe temporal droit dans le traitement temporel des durées plus longues (Melgire et al., 2005 ; Perbal et al., 2001). Ces résultats, complétés par des données d'imagerie cérébrale (Belin et al., 2002), suggèrent que des fenêtres d'intégration temporelle différentes existent au niveau des aires auditives gauche et droite. Le cortex auditif gauche aurait une fenêtre d'intégration temporelle courte qui le rendrait sensible à des événements séquentiels rapides (i.e., 20-50 ms) alors que le cortex auditif droit serait sensible à des événements plus lents (i.e., 150-250 ms). Ces données soulèvent l'existence d'asymétries cérébrales dans le traitement temporel et la mise en œuvre de processus cognitifs distincts dans le traitement des durées inférieures ou supérieures à 100ms.

Contrairement à une idée largement répandue, l'asymétrie fonctionnelle des aires auditives ne dépendrait donc pas de la nature verbale ou non verbale des stimuli. Elle découlerait plutôt des propriétés acoustiques des signaux de parole ou de musique impliquant de manière privilégiée les aires temporales gauches ou droites, respectivement. L'ensemble de ces données obtenues dans le cadre de l'épilepsie du lobe temporal est compatible avec une hypothèse initialement proposée et récemment confirmée par les travaux de l'équipe de Robert Zatorre à Montréal (Albouy et al., 2020 ; Zatorre et al., 2002). Selon ces auteurs, les indices acoustiques qui servent à percevoir les sons de la parole ne sont pas les mêmes que ceux qui sont généralement impliqués dans le traitement de la musique (Zatorre & Baum, 2012). L'information fournie par les phonèmes parlés se traduit par des modifications rapides du signal acoustique, une catégorie de changement acoustique pour laquelle l'hémisphère gauche est compétent (Hellige, 1993 ; Ivry & Robertson, 1998). Par contre, les modifications du signal acoustique relatives au

traitement de l'information spectrale (i.e., hauteur tonale en musique ou composante émotionnelle de la voix) tendent à se produire sur une échelle de temps beaucoup plus lente et ainsi nécessitent une sensibilité à des variations de hauteur plus fines pour laquelle l'hémisphère droit serait spécialisé. L'écoute musicale pourrait alors impliquer les fonctions complémentaires des lobes temporaux droit et gauche dans le traitement des modulations acoustiques.

#### 4. La mémoire musicale

Les études menées chez les patients présentant une épilepsie du lobe temporal ont largement contribué à l'amélioration des connaissances concernant le fonctionnement de la mémoire musicale. Tout d'abord, elles ont montré que la mémoire à court terme d'une hauteur tonale dépendait de l'intégrité des aires associatives localisées dans la partie antérieure du lobe temporal droit (Samson & Zatorre, 1991 ; Zatorre & Halpern, 1993), mais également des régions frontales droites. Ce serait donc les régions corticales à droite (i.e., temporales latérales et frontales) et non celles médianes (i.e., hippocampe et aires avoisinantes) qui participeraient au maintien à court terme des informations musicales (pour revue, Samson, 1999). Cette hypothèse, initialement proposée dans le contexte de l'épilepsie, a été validée par les données d'imagerie cérébrale (Zatorre et al., 1994).

Quant à la mémoire à long-terme musicale, elle dépendrait de la contribution du lobe temporal médian, comme en témoignent des études évaluant l'apprentissage de mélodies (Samson, 1999 ; Samson & Zatorre, 1992 ; Zatorre, 1985) ou de chants d'oiseaux (Milner et al., 1965). Les résultats de ces travaux ont montré que la présence d'une lésion du lobe temporal médian droit ou gauche chez des patients épileptiques testés avant ou après un traitement chirurgical, entraînait une lenteur d'apprentissage musical. Toutefois, il est apparu que l'aptitude à reconnaître ces mélodies après un délai de 24h recrutait préférentiellement les régions du lobe temporal droit. À nouveau, ces données suggèrent la contribution prédominante du lobe temporal droit dans la fonction musicale et plus particulièrement dans la consolidation en mémoire d'une information musicale.

Le processus cognitif de construction d'un souvenir musical encodé dans un contexte temporel et spatial particulier, tel qu'il vient d'être décrit, fait référence aux aptitudes de la mémoire épisodique. Toutefois, les souvenirs stockés dans notre répertoire musical renvoient à l'équivalent musical de la mémoire sémantique. Le sentiment de familiarité que nous ressentons quotidiennement à l'écoute d'une chanson connue permet de tester le

fonctionnement de cette mémoire sémantique ou conceptuelle. L'émergence du sentiment de familiarité a la caractéristique d'être très rapide en musique puisque seule l'écoute d'un bref extrait musical (i.e., 500ms) permet de distinguer un extrait connu d'un extrait inconnu (Della Bella et al., 2003). Cette faculté évaluée chez des patients opérés d'une épilepsie pharmaco-résistante n'est pas affectée par la présence d'une lésion du lobe temporal médian (Huijgen et al., 2015). Il semble donc que la mémoire sémantique pour la musique ne dépende pas du lobe temporal médian, mais plutôt des structures corticales.

Un autre phénomène intrigant de la mémoire musicale concerne l'effet d'exposition. Cet effet se traduit par une augmentation de la préférence pour un air musical entendu qu'une seule fois par comparaison à un air musical qui n'a jamais été présenté. Cet effet très robuste est connu en psychologie sociale depuis longtemps (Meyer, 1903), mais son interprétation n'est pas clairement établie puisqu'il pourrait être d'origine mnésique ou émotionnelle. En utilisant un paradigme expérimental mesurant l'effet d'exposition dans le domaine musical (Peretz, 1998), l'étude de patients présentant une lésion unilatérale du lobe temporal médian montre que cet effet, qui se manifeste normalement chez des patients atteints d'une lésion temporale gauche, disparaît en présence d'une lésion droite (Samson & Peretz, 2005) suggérant le rôle du lobe temporal droit dans l'effet d'exposition. Toutefois, la reconnaissance explicite de ces extraits musicaux est altérée après une lésion droite, mais également gauche. En d'autres termes, certains patients, notamment ceux présentant une lésion à gauche, préfèrent les extraits musicaux entendus précédemment alors qu'ils ne les reconnaissent pas lorsque cela leur est explicitement demandé. Selon ces résultats, il semblerait que cet effet d'exposition reposerait sur une mémoire dite « perceptive » (e.g., fluence perceptive) qui se distinguerait clairement de la mémoire épisodique. Une telle dissociation entre la reconnaissance implicite impliquant la mémoire perceptive et la reconnaissance explicite engageant les aptitudes de mémoire épisodique démontre l'implication de réseaux cérébraux distincts. Enfin, ces travaux suggèrent que notre goût musical pourrait être modulé par des processus mnésiques sans que nous en ayons nécessairement conscience.

## 5. Les émotions musicales

L'écoute de la musique peut générer en nous de l'apaisement, de la joie, de la tristesse, ou encore de la peur, autant d'émotions qui font partie intégrante de l'expérience musicale (Samson & Dellacherie, 2013). La musique est également très efficace pour induire la peur ou

annoncer un danger (i.e., musique de film, Cohen, 2011). Ainsi, la première étude démontrant le rôle de l'amygdale dans la reconnaissance de la peur avec un matériel musical a été réalisée chez des personnes épileptiques (Gosselin et al., 2005). Les résultats de ces patients, comme ceux d'une autre patiente présentant une lésion bilatérale des amygdales évaluée avec cette même tâche (Gosselin et al., 2007), ont révélé un déficit sélectif de reconnaissance de la peur en musique, alors que la reconnaissance de la joie, la tristesse ou l'apaisement est préservée. Des résultats convergents ont été obtenus chez des patients comparables avec d'autres extraits musicaux (Khalifa, Delbe, et al., 2008 ; Khalifa, Guye, et al., 2008), mais également avec des expressions vocales (Dellacherie, Hasboun, et al., 2011) ou faciales (Adolphs et al., 1995 ; Gosselin et al., 2011), démontrant l'existence d'une représentation amodale de la peur dans l'amygdale. À noter toutefois qu'à la différence des études sur la perception musicale, les études sur les émotions musicales ne révèlent pas d'effet de latéralité de la lésion cérébrale sur les jugements émotionnels. De plus, l'étude de Dellacherie, Hasboun, et al. (2011) sur les émotions vocales a mis en évidence que les patients semblaient moins anxieux que les participants sains. La peur étant souvent considérée comme le précurseur de l'anxiété, il se peut que cette difficulté à reconnaître la peur diminue de ce fait l'anxiété. À l'inverse, l'anxiété, caractérisée par un biais de négativité accru, est souvent associée à une hyperactivation de l'amygdale. Une diminution de ce biais de négativité pourrait alors expliquer la baisse de la réactivité émotionnelle chez ces patients opérés au niveau du lobe temporal. Bien qu'il soit difficile de privilégier une hypothèse, ces données soulignent l'existence de liens subtils entre ce trouble émotionnel et certaines fluctuations de l'humeur.

L'approche catégorielle des émotions adoptée dans les études précédemment citées repose sur un nombre fini de catégories émotionnelles (Ekman, 1992). Elle se distingue de l'approche dimensionnelle qui définit les émotions selon deux dimensions principales (Russell, 1980) : la dimension de valence, qui permet de différencier les émotions négatives (ou désagréables) des émotions positives (ou agréables) et la dimension d'excitation ou d'éveil (ou arousal en anglais) allant d'un faible niveau à un haut niveau. L'approche dimensionnelle semble particulièrement adaptée à l'étude des émotions musicales dans la mesure où elle tient compte des variations continues du ressenti émotionnel.

Dans cette perspective, il a été montré que les patients épileptiques avec une lésion unilatérale du lobe temporal semblaient juger l'éveil suscité par l'écoute musicale moins finement que les témoins, ce qui n'était pas le cas pour la valence (Gosselin et al., 2005). À

nouveau, ces observations sont compatibles avec les données de l'imagerie cérébrale montrant que le traitement de l'éveil serait pris en charge par le lobe temporal et plus précisément par l'amygdale (pour revue, voir Hamann, 2001) alors que celui de la valence serait dépendant des régions frontales (Anderson et al., 2003 ; Gläscher & Adolphs, 2003 ; Kensinger & Corkin, 2004 ; Small et al., 2003). Cependant, à partir d'une méthodologie très différente visant à évaluer le ressenti émotionnel, Dellacherie, Bigand, et al. (2011) ont utilisé des jugements de similarité émotionnelle d'extraits musicaux variant graduellement en termes de valence et d'éveil. La consigne précisait aux participants de se focaliser sur le ressenti émotionnel et n'impliquait pas l'utilisation explicite d'un label verbal (i.e., nommer l'émotion ressentie) désignant les émotions. Bien que les participants n'aient pas reçu l'instruction explicite de classer les extraits musicaux selon la valence et l'éveil, l'analyse de leurs réponses montre qu'ils ont jugé les stimuli musicaux selon ces deux dimensions. De tels jugements subjectifs n'étaient pas altérés par la présence de lésion temporale unilatérale d'origine épileptique démontrant que, malgré des difficultés de reconnaissance explicite des émotions portées par la musique, le jugement implicite ou le ressenti émotionnel musical peut être préservé. La dissociation entre le jugement implicite et explicite des émotions musicales ainsi démontrée mériterait d'être approfondie afin d'améliorer, en outre, notre compréhension des bénéfices thérapeutiques de l'écoute musicale.

À partir des études utilisant la neuroimagerie fonctionnelle (e.g., imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), tomographie par émissions de positons (TEP)), il a été montré que le lobe temporal (i.e., aires auditives et amygdale), le lobe frontal (i.e., régions orbito-frontales et préfrontales) et d'autres régions sous corticales (i.e., striatum) peuvent réagir aux émotions musicales. Toutefois, la manière dont ces différentes zones du cerveau sont orchestrées reste encore peu connue. Pour clarifier cette question, des études menées durant l'enregistrement électrophysiologique de l'activité du cerveau (i.e., enregistrement électroencéphalographique intra-cérébral) de personnes présentant une épilepsie pharmaco-résistante ont été réalisées (Dellacherie et al., 2009 ; Omigie et al., 2014, 2015). Dans ce contexte, des électrodes sont placées dans le cerveau de certains patients chez qui la localisation du foyer épileptique n'a pas pu être identifiée par les examens plus habituels (i.e., enregistrement électroencéphalographique à la surface du scalp soit l'EEG de surface). La réponse des neurones est alors enregistrée avec des électrodes intra-cérébrales. Il est important de souligner que ces recherches ne modifient en rien la prise en charge clinique de ces patients. Cette méthode, qui présente une excellente résolution temporelle et spatiale, a permis

d'analyser la séquence d'activation de différentes régions cérébrales, dont le cortex auditif, l'amygdale et le cortex orbito-frontal. Ces enregistrements intra-cérébraux, réalisés pendant que les patients écoutent des accords musicaux consonants et dissonants, ont montré que l'amygdale est une structure pivot dans le réseau dédié aux émotions musicales. L'analyse de la direction des connexions entre ces régions cérébrales a permis de mettre en évidence pour la première fois que la connectivité de l'amygdale avec le cortex orbito-frontal et avec le cortex auditif était renforcée durant l'écoute des accords dissonants et consonants (Dellacherie et al., 2009). Une étude de cas réalisée dans les mêmes circonstances a confirmé l'importance du couplage entre les aires auditives et l'amygdale durant l'écoute d'extraits orchestraux induisant des ressentis émotionnels variés (Liégeois-Chauvel et al., 2014). Dans la continuité de ces observations, les données obtenues sur des groupes de patients ont montré que l'amygdale réagissait en premier face à des stimuli émotionnels (Omigie et al., 2014), en les différenciant selon leurs propriétés physiques. Ensuite, elle influencerait le cortex auditif, prenant en charge l'analyse des propriétés acoustiques, ainsi que le cortex frontal impliqué dans l'évaluation subjective de la signification émotionnelle (Omigie et al., 2015). Le cortex orbito-frontal contribuerait plus particulièrement à l'expérience subjective du plaisir musical. L'ensemble de ces résultats concernant la manière dont le cerveau réagit aux émotions musicales démontrent l'activation d'un large réseau cérébral qui inclut l'amygdale, les aires auditives et plusieurs régions du lobe frontal.

## 6. L'expertise musicale et le transfert d'apprentissage

Un autre domaine qui pourrait s'avérer très prometteur concerne les bénéfices de la pratique musicale à vocation thérapeutique sur l'organisation cérébrale des patients épileptiques et sur la ré-organisation cérébrale faisant suite à un traitement neurochirurgical. Cette idée s'inscrit dans la continuité de plusieurs travaux qui ont montré que la pratique musicale induit des changements structurels et fonctionnels dans le cerveau, processus connu sous le nom de plasticité cérébrale (Jäncke, 2009). Cette plasticité induite par un entraînement musical est retrouvée chez les enfants comme les adultes (pour revue, Herholz & Zatorre, 2012 ; Merrett & Wilson, 2012). Ainsi, il existerait de nombreuses différences entre le cerveau des musiciens et celui des non-musiciens (pour revue, Wan & Schlaug, 2010). Par exemple, le cortex cérébral des musiciens serait plus épais, notamment au niveau du lobe temporal, que celui des non-musiciens (Bermudez et al., 2009). De plus, un volume de fibres plus important

connectant les régions frontales et temporales est retrouvé chez les musiciens par rapport aux non-musiciens permettant une meilleure connectivité entre ces régions (Halwani et al., 2011).

Grâce aux changements induits par un entraînement souvent intensif et régulier, responsable notamment du développement de l'expertise, les aptitudes non-musicales reposant sur le fonctionnement des mêmes zones cérébrales pourraient également s'améliorer. Il s'agirait alors d'un transfert d'apprentissage (pour revue, Benz et al., 2016). Ainsi, en testant la mémoire verbale de musiciens et non-musiciens, Tierney et al. (2008) ou encore Franklin et al., (2008) ont montré que les musiciens se souvenaient mieux et plus longtemps que les non-musiciens des informations apprises (Benz et al., 2016 ; Besson et al., 2011).

Pour tester cette hypothèse, Bird et al. (2019) ont testé les aptitudes musicales et non-musicales de patients présentant une épilepsie impliquant le lobe temporal, frontal, pariétal ou occipital et qui se distinguaient en fonction de leur expérience musicale. Qu'ils soient musiciens ou non musiciens, aucune différence n'a été mise en évidence entre les aptitudes musicales des patients et des témoins appariés. Cependant, le profil de réponse obtenu pour les aptitudes non-musicales, incluant les capacités verbales et non verbales, et en particulier la mémoire et le fonctionnement exécutif, variait en fonction de l'expertise musicale. Tandis que chez les épileptiques non musiciens, ces aptitudes étaient déficitaires par rapport à celles des témoins, il n'en est pas de même pour les musiciens. La présence d'une lésion cérébrale chez les patients qui avaient bénéficié de quelques années de pratique musicale ne semble pas affecter leurs aptitudes non musicales par rapport aux témoins musiciens. Selon ces auteurs, la plasticité induite par la pratique musicale renforcerait les structures cérébrales et leurs connexions limitant ainsi les effets délétères d'une lésion cérébrale d'origine épileptique (Bird et al., 2019). Le fait que la formation musicale, tout en améliorant les capacités musicales, entraîne également une augmentation des aptitudes non-musicales renvoie à la notion de transfert des apprentissages entre les compétences musicales et non-musicales (Besson et al., 2011). Comme cela a été suggéré par Omigie & Samson (2014), l'entraînement musical, en améliorant la plasticité cérébrale, aurait un effet sur l'organisation et la ré-organisation cérébrale associées à l'apparition d'une lésion ou à un traitement chirurgical du cerveau. Cette idée, compatible avec de nombreuses observations cliniques, suggère que la pratique musicale pourrait avoir un effet neuroprotecteur contre les séquelles cognitives de certaines maladies ou lésions neurologiques. Plusieurs cas de musiciens professionnels montrant une amélioration de leurs fonctions musicales, mais également non musicales, après leur chirurgie de l'épilepsie

(Trujillo-Pozo et al., 2013 ; Wieser & Walter, 1997 ; Wilson et al., 2013) semblent compatibles avec cette hypothèse. Toutefois, les études ayant testé de manière systématique l'impact d'une prise en charge musicale auprès de cette population clinique sont inexistantes à l'heure actuelle. Les preuves scientifiques sont donc encore insuffisantes pour se prononcer sur les bénéfices thérapeutiques d'un entraînement musical sur l'organisation fonctionnelle dans ce contexte clinique.

## 7. Conclusion

L'ensemble des recherches rapportées dans ce chapitre, et notamment celles menées chez des patients présentant une épilepsie du lobe temporal ou du lobe frontal, ont largement contribué à l'amélioration des connaissances sur les fondements neurobiologiques et psychologiques de la fonction musicale. Elles ont apporté de nouveaux éclairages sur la compréhension du fonctionnement intégré du cerveau sain et pathologique dans les mécanismes de perception et de mémoire musicale, mais également dans les réactions émotionnelles musicalement induites. Bien que la pertinence des interventions basées sur la musique commence à faire ses preuves auprès de patients présentant une pathologie neurodégénérative ou vasculaire (pour revue, Sihvonen et al., 2017), aucune étude, à notre connaissance, n'a été réalisée chez des patients épileptiques ou dans un contexte neurochirurgical. En améliorant la plasticité cérébrale, l'entraînement musical pourrait conduire, par transfert d'apprentissage, à l'amélioration d'autres fonctions tels que le langage, l'attention ou la mémoire limitant ainsi les effets délétères d'une lésion cérébrale. Faciliter l'engagement de réseaux cérébraux non endommagés ou de régions homologues dans l'hémisphère opposé par la pratique artistique ouvre des perspectives thérapeutiques prometteuses. La validité de cette hypothèse devra être validée par des études futures afin de proposer des interventions musicales adaptées aux personnes souffrant de dysfonctionnements cognitifs et émotionnels associés à l'épilepsie, mais également à d'autres pathologies.



## CHAPITRE IV : Effet des émotions musicales sur la mémoire

Au cours de cette quatrième partie, les effets des dimensions émotionnelles, l'arousal (i.e., éveil ou excitation en français) et la valence émotionnelle, sur la mémoire épisodique des adultes sains et des patients présentant une lésion unilatérale du lobe temporal (LT) ou plus précisément du lobe temporal médian (LTM) seront présentés. Les études ayant recours à un matériel émotionnel non musical seront abordées avant de nous concentrer sur les études dans le domaine musical. Compte tenu du nombre limité d'études dans le domaine musical, la section qui y est dédiée ne présentera pas le même niveau de détails que celle sur le matériel non musical. En effet, par rapport au matériel verbal ou imagé, la musique est un matériel intrinsèquement émotionnel. Les études n'ont donc pas pu comparer des extraits musicaux émotionnels à des extraits neutres. De ce fait, l'effet des émotions sur la mémoire a été abordé différemment dans le domaine musical en manipulant le type d'émotion généré par les extraits musicaux afin de comparer leur impact sur les performances mnésique.

### 1. Mémoire émotionnelle non musicale

#### 1.1. Effets de l'arousal

##### 1.1.1. Population témoin

Chez les adultes sains, il a été montré que les stimuli (i.e., images, mots) d'arousal élevé étaient mieux reconnus que ceux d'arousal faible (pour revue, Hamann, 2001) lors de tâches de reconnaissance réalisées immédiatement après l'encodage (Bradley et al., 1992) ou après des délais plus longs de plusieurs semaines (Cahill & McGaugh, 1995 ; Ochsner, 2000), d'une année (Bradley et al., 1992) voire même de plusieurs années (Wagner et al., 2006).

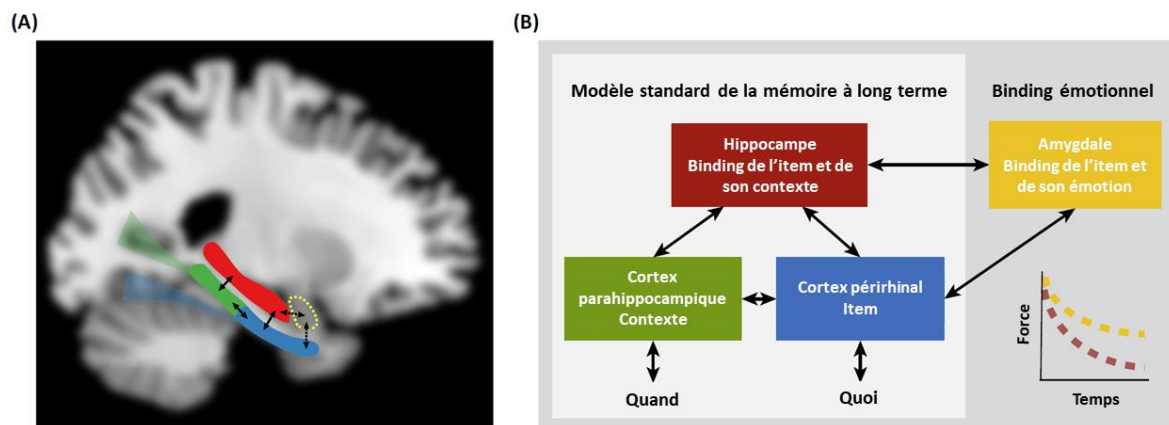
L'impact de l'arousal serait lié à une hausse de l'attention portée spécifiquement sur les stimuli d'arousal élevé au point de diminuer la perception des stimuli d'arousal faible (Mather & Sutherland, 2011 ; Talmi, 2013). Ce biais attentionnel entraînerait un traitement plus profond lors de l'encodage des stimuli d'arousal élevé facilitant ainsi leur récupération (Kensinger & Corkin, 2004 ; Sharot & Phelps, 2004 ; Talmi et al., 2008). De plus, la trace mnésique de ces stimuli serait renforcée par un processus de consolidation, transformant les souvenirs nouvellement formés en une trace mnésique permanente, l'oubli serait alors ralenti (Hamann, 2001 ; Payne et al., 2008 ; Sharot & Phelps, 2004 ; Sharot & Yonelinas, 2008). Selon plusieurs auteurs, le processus de consolidation des stimuli d'arousal élevé serait plus important pendant

une période de sommeil que pendant une période d'éveil. Cela entraînerait des performances de reconnaissance des stimuli d'arousal élevé supérieures après une période de sommeil qu'après une période de veille (Hu et al., 2006 ; Payne et al., 2008). Le sommeil jouerait donc un rôle dans la consolidation des souvenirs émotionnels qui dépasserait celui qu'il a pour les souvenirs neutres.

Au niveau anatomique, ce rehaussement émotionnel de la mémoire pour les stimuli d'arousal élevé serait lié, en partie, aux fonctions de l'amygdale et de ses interactions avec l'hippocampe (Phelps, 2004). En présence d'un stimulus d'arousal élevé, et ce quelle que soit la nature du matériel (Aubé et al., 2015 ; Lin et al., 2020), l'amygdale s'activerait dès les premières étapes du traitement (Domínguez-Borràs et al., 2019 ; pour revue, Murray et al., 2014). Plusieurs études en imagerie cérébrale ont montré que l'activation de l'amygdale et de l'hippocampe et la connectivité entre ces structures étaient plus fortes lors de l'encodage de stimuli d'arousal élevé que lors de l'encodage de stimuli d'arousal faible (Dolcos et al., 2004a ; Fastenrath et al., 2014). Il a également été montré que l'activité de l'amygdale pendant la phase d'encodage était corrélée positivement aux performances mnésiques évaluées après un délai court ou après un délai long de plusieurs semaines (Canli et al., 2000 ; Dolcos et al., 2004a ; Hamann, Ely, et al., 1999 ; Richardson et al., 2004 ; Ritchey et al., 2008). De plus, Dolcos et al. (2005) ont montré que l'activation de l'amygdale et de l'hippocampe était plus importante lors de la reconnaissance d'un stimulus d'arousal élevé que lors de celle d'un stimulus d'arousal faible durant une tâche de reconnaissance effectuée un an après la phase d'encodage. Enfin, l'amygdale modulerait l'activité d'autres régions du cerveau telles que l'hippocampe, afin de renforcer la consolidation mnésique des stimuli d'arousal élevé (Hermans et al., 2014 ; McGaugh, 2018). Ces données soutiennent l'hypothèse que l'amygdale et l'hippocampe seraient des structures clés de l'encodage, de la consolidation et de la récupération en mémoire des stimuli d'arousal élevé.

Alors que l'amygdale joue un rôle crucial dans la mémoire émotionnelle, aucun modèle traditionnel de la mémoire épisodique ou de la mémoire à long terme n'a inclus cette structure. C'est pour cette raison que Yonelinas & Ritchey (2015) ont développé le modèle du *binding* émotionnel (voir **Figure 2**). Tout comme l'hippocampe lierait l'item et son contexte (*binding of item and context* ; Diana et al., 2007), l'amygdale lierait l'item à l'émotion qu'il provoque chez l'individu. Ainsi, face à un stimulus d'arousal élevé, l'amygdale s'activerait et lierait la réponse émotionnelle à l'item encodé par le cortex périrhinal. Selon les auteurs, ce *binding*

émotionnel supporterait ensuite le rappel et serait plus résistant à l'oubli. Cette résistance face à l'oubli serait liée aux caractéristiques de l'amygdale. En effet, par rapport à l'amygdale, l'hippocampe présente un niveau élevé de mort cellulaire et de neurogenèse (Akers et al., 2014 ; Biebl et al., 2000 ; Fares et al., 2019). L'oubli des informations pourrait donc être accéléré du fait de la mort des cellules et des interférences provoquées par les nouvelles. De plus, comme il y a généralement moins d'expériences émotionnelles que d'expériences neutres à mémoriser de manière simultanée, l'amygdale serait moins touchée par les phénomènes d'interférences (Yonelinas & Ritchey, 2015).



**Figure 2.** (A) Les régions du lobe temporal médian impliqué dans la mémoire épisodique. (B) Le modèle standard de la mémoire à long terme et modèle du binding émotionnel (adaptée de Yonelinas & Ritchey, (2015))

### 1.1.2. Population clinique avec une lésion du lobe temporal

L'amygdale étant lésée chez les patients présentant une lésion du LT, les différentes étapes de la mémorisation ne seraient alors pas renforcées pour les stimuli d'arousal élevé. De ce fait, une diminution du rehaussement émotionnel de la mémoire pour ces stimuli serait attendue chez les patients présentant une lésion du LT. En effet, les premières études lésionnelles, portant sur des patients atteints de lésions sélectives bilatérales de l'amygdale, ont mis en évidence une diminution de l'effet de l'arousal sur la mémoire par comparaison aux participants sains ; les patients ne démontrant pas l'effet attendu en faveur des stimuli d'arousal élevé par comparaison aux stimuli d'arousal faible ou neutre (Adolphs et al., 1997 ; Babinsky et al., 1993 ; Cahill et al., 1995 ; Hamann, Lee, et al., 1999 ; Phelps et al., 1998). Des résultats similaires ont été retrouvés chez des patients présentant une lésion unilatérale du LTM incluant l'amygdale. Ainsi, la diminution de l'effet de l'arousal était observée uniquement chez les patients présentant une lésion du LTM gauche lorsque des stimuli verbaux ou facilement

verbalisables étaient utilisés (Buchanan et al., 2001 ; Frank & Tomaz, 2003) ou lors d'une lésion du lobe temporal droit ou gauche lorsque des stimuli picturaux ou olfactifs, plus difficiles à verbaliser, étaient utilisés (Åhs et al., 2010 ; Pouliot & Jones-Gotman, 2008). En conclusion, le bénéfice de l'arousal élevé sur la mémoire des patients présentant une lésion du LTM serait donc diminué, quelle que soit la latéralité de la lésion, quand le matériel utilisé est difficilement verbalisable.

## 1.2. Effets de la valence

### 1.2.1. Population témoin

Les stimuli de valence négative ou positive seraient mieux mémorisés que les stimuli neutres (Adelman & Estes, 2013 ; Cabeza & Dolcos, 2002 ; Dolcos et al., 2004b ; Mickley & Kensinger, 2008). Plus précisément, comme le souligne la revue de la littérature de Kensinger (2007), les stimuli (i.e., mots, images) de valence négative semblent être mieux mémorisés que ceux de valence positive chez les adultes sains. Cet effet serait retrouvé après 24 heures (Denburg et al., 2003 ; Waring & Kensinger, 2009) et même après plusieurs semaines (Comblain et al., 2004 ; Hamann, Ely, et al., 1999 ; Ochsner, 2000 ; Pierce & Kensinger, 2011), suggérant un biais de négativité dans la mémoire émotionnelle chez les jeunes adultes.

Ce rehaussement émotionnel de la mémoire pour les stimuli de valence négative serait, en partie, lié à un biais attentionnel qui a été démontré au niveau comportemental (Pratto & John, 1991) ainsi qu'au niveau neurophysiologique (Smith et al., 2003). En effet, notre attention serait automatiquement attirée par les stimuli de valence négative par rapport à ceux de valence positive, entraînant ainsi une meilleure mémorisation. De plus, l'étude en neuroimagerie de Kensinger & Corkin, (2004) suggère que le rehaussement de la mémoire pour les stimuli de valence négative serait soutenu par des interactions entre le LTM et le cortex préfrontal qui sont associées à des processus d'encodage contrôlés et auto-générés, tels que l'élaboration ou la répétition des informations. Enfin, plusieurs études d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) confirment que le traitement de la valence émotionnelle reposerait principalement sur le cortex orbito-frontal (Anderson et al., 2003 ; Small et al., 2003).

### 1.2.2. Population clinique avec une lésion du lobe temporal

Les structures soutenant le traitement de la valence émotionnelle étant plutôt préservées chez les patients présentant une lésion du LT, un effet de cette dimension émotionnelle et

notamment de la valence négative sur la mémoire devrait donc être retrouvé. Une des premières études portant sur l'impact de cette dimension émotionnelle sur la mémoire des patients présentant une lésion du LTM est celle de Phelps et al. (1997) qui a testé le rappel de mots de valence positive, négative ou neutre une minute après la phase d'encodage. Les résultats montrent que les performances de rappel des patients, quelle que soit la latéralisation de la lésion, ne se différenciaient pas de celles des participants contrôles. Ils rappelaient tous plus de mots de valence positive et négative que de mots neutres. Un effet de la valence sur la mémoire verbale testée après un délai court serait donc retrouvé malgré une lésion du LTM. Plus précisément, les patients présentant une lésion du LTM droit et les participants contrôles rappelaient plus de mots de valence positive que de valence négative, résultat en contradiction avec la littérature précédemment citée (Kensinger, 2007), tandis que les performances des patients présentant une lésion du LTM gauche pour les deux types de valence ne différaient pas. En testant la reconnaissance d'odeurs de valence négative ou positive après un délai d'une semaine, Pouliot & Jones-Gotman (2008) ont retrouvé un biais de négativité chez les patients comme chez les participants contrôles avec de meilleures performances de reconnaissance pour les odeurs de valence négative. Cette étude confirmerait que l'effet de la valence sur la mémoire serait retrouvé chez les patients présentant une lésion du LTM qui bénéficieraient également du biais de négativité retrouvé dans la littérature (Kensinger, 2007).

De nouveau, Buchanan et al. (2001) nuancent ces résultats selon la latéralisation de la lésion. Les auteurs ont montré que les patients présentant une lésion du LTM, quelle que soit la latéralisation de leur lésion, et les participants contrôles rappelaient plus d'images de valence positive ou négative que neutre. Avec un matériel verbal, cette supériorité des performances pour les stimuli émotionnels n'était retrouvée que chez les patients présentant une lésion du LTM droit et les participants contrôles. Plus précisément, ces deux groupes rappelaient plus d'images et de phrases de valence négative que neutre. Enfin, alors que les participants contrôles rappelaient plus d'images et de phrases de valence positive que neutre, aucun groupe de patients n'avait de performances de mémoire améliorées pour les stimuli de valence positive. Ainsi, seul un effet de la valence négative serait retrouvé chez les patients présentant une lésion du LTM droit. Plus récemment, Carvajal et al. (2020) ont testé l'apprentissage de paires de mots de valence positive, négative ou neutre chez des patients présentant une lésion du LTM. Comme attendu, les patients présentant une lésion du LTM gauche rappelaient globalement moins de mots que les patients présentant une lésion du LTM droit qui eux-mêmes en rappelaient moins que les participants contrôles. De plus, alors que les participants contrôles

présentaient un biais de négativité, les patients présentant une lésion du LTM droit ne semblaient pas sensibles à la manipulation de la valence, leurs performances étant similaires entre les trois catégories de mots. Enfin, de manière surprenante, les patients présentant une lésion du LTM gauche rappelaient plus de mots neutres que de mots émotionnels. Selon les auteurs, ces patients ne bénéficieraient plus du rehaussement émotionnel de la mémoire pour les stimuli de valence émotionnelle et présenteraient même une difficulté supplémentaire à rappeler des mots émotionnels par rapport à des mots neutres lors d'une lésion du LTM gauche. Ainsi, l'effet de la valence émotionnelle sur les performances en mémoire de patients présentant une lésion du LTM reste débattu.

### 1.3.Effets de l'arousal et de la valence émotionnelle

La majorité des études dans le domaine de la mémoire émotionnelle a examiné l'effet de l'arousal et de la valence indépendamment l'un de l'autre. Rares sont celles qui ont examiné les deux dimensions simultanément. Il est alors difficile de préciser l'effet de l'arousal par rapport à celui de la valence émotionnelle sur la mémoire. Parmi les quelques études chez les participants contrôles ayant manipulé conjointement ces deux dimensions, certaines ont montré qu'elles avaient des effets distincts sur la mémoire : les stimuli d'arousal élevé étaient mieux mémorisés que ceux d'arousal faible et les stimuli de valence négative étaient mieux mémorisés que ceux de valence positive (Comblain et al., 2004 ; Mickley Steinmetz & Kensinger, 2009 ; Ochsner, 2000).

D'autres études ont révélé une interaction entre ces deux dimensions. Cependant la nature de cette interaction différait (Kensinger, 2008 ; Li et al., 2018 ; Waring & Kensinger, 2009, 2011). Kensinger (2008) a montré que la valence émotionnelle n'affectait pas le rappel immédiat des mots d'arousal élevé : ils sont aussi bien rappelés qu'ils soient de valence positive ou négative. En revanche, la valence influencerait le rappel des mots d'arousal faible : ceux de valence négative étant mieux rappelés que ceux de valence positive. Les résultats des études de Waring & Kensinger (2009, 2011), ayant eu recours à une tâche de reconnaissance d'images après un délai de 10 minutes, s'accordent avec ceux de Kensinger (2008) concernant l'effet de la valence sur les stimuli d'arousal faible. En revanche, ces études retrouvent également une influence de la valence sur les stimuli d'arousal élevé : les images de valence positive étaient mieux reconnues que celles de valence négative. Plus récemment, lors d'une tâche de reconnaissance réalisée immédiatement après la phase d'encodage, Li et al. (2018) ont montré que la valence influençait la reconnaissance des images d'arousal élevé, mais aussi celles

d'arousal faible. Quel que soit le niveau d'arousal, les images de valence négative étaient mieux reconnues que celles de valence positive. Ainsi, ces études s'accordent sur l'effet de la valence pour les stimuli d'arousal faible, en revanche des discordances sont retrouvées pour ceux d'arousal élevé.

Les effets respectifs de l'arousal et de la valence émotionnelle sur la reconnaissance ont, par ailleurs, été mis en évidence dans plusieurs études de neuroimagerie fonctionnelle. Les données ainsi obtenues suggèrent que ces deux dimensions dépendraient de mécanismes cérébraux distincts (Anderson et al., 2003 ; Kensinger & Corkin, 2004). Les effets de l'arousal dépendraient d'un réseau amygdalo-hippocampique et ceux de la valence d'un réseau hippocampo-préfrontal. Au sein du LTM, les deux réseaux qui sous-tendent l'arousal et la valence émotionnelle impliqueraient l'hippocampe mais seul le réseau impliqué dans les effets de l'arousal recruterait l'amygdale. Ces données sont cohérentes avec l'étude neuropsychologique de Pouliot & Jones-Gotman (2008) qui a examiné les effets des dimensions émotionnelles sur la mémoire des patients présentant une lésion du LTM. Pour ce faire, les auteurs ont examiné la reconnaissance de stimuli olfactifs dont l'arousal et la valence émotionnelle variaient. Lors de la tâche de reconnaissance mnésique réalisée après une semaine de délai, seuls des effets indépendants des deux dimensions émotionnelles ont été retrouvés. Les patients et les participants contrôles reconnaissaient plus les odeurs de valence négative que les odeurs de valence positive. En revanche, par rapport aux participants contrôles, les patients ne reconnaissaient pas plus d'odeurs d'arousal élevé que d'arousal faible, ce qui est cohérent au vu de leur lésion de l'amygdale.

Il est intéressant de noter que les études précédemment citées ayant retrouvé une interaction de l'arousal et de la valence émotionnelle testaient la reconnaissance mnésique après seulement quelques minutes (Gomes et al., 2013 ; Kensinger, 2008 ; Li et al., 2018; Waring & Kensinger, 2009, 2011) alors que les études ne la retrouvant pas évaluaient les performances mnésiques après un délai variant d'une heure à deux semaines (Comblain et al., 2004 ; Mickley Steinmetz & Kensinger, 2009 ; Ochsner, 2000). Cela suggérerait que les effets de l'arousal et de la valence émotionnelle sur la mémoire varient selon le délai entre la phase d'encodage et la phase de reconnaissance et que ces deux dimensions influenceraient indépendamment le processus de consolidation. Les résultats précédemment rapportés justifient l'importance de considérer ces deux dimensions émotionnelles dans les études explorant l'impact des émotions sur la mémoire. De plus, le délai séparant la phase d'encodage

de la phase de récupération des informations semble être un facteur majeur à prendre en compte dans ce domaine.

## 2. Effet du délai

La plupart des recherches antérieures ont évalué la mémoire soit après un délai relativement court (i.e., quelques minutes) entre la phase d'encodage et la phase de récupération, soit après un délai long (i.e., varie de 24 heures à plusieurs semaines). Rares sont les études qui ont comparé les performances mnésiques après un délai court et un délai long afin d'examiner l'effet des émotions sur le processus de consolidation. De plus, à notre connaissance, seule l'étude de Waring et Kensinger (2009) a manipulé conjointement le délai entre la phase d'encodage et celle de récupération ainsi que le niveau d'arousal et de valence émotionnelle des stimuli émotionnels. L'originalité du paradigme utilisé dans cette étude est de tester des performances après un délai court et un délai long lors d'une unique tâche de reconnaissance. Pour cela, une première moitié des images était présentée le premier jour et l'autre moitié le lendemain. Après la deuxième phase d'encodage, un test de reconnaissance, comprenant toutes les images du premier et du second jour ainsi que des distracteurs, était réalisé. Ainsi, par rapport aux études réalisant deux tâches de reconnaissance (e.g., Sharot & Phelps, 2004), la condition de reconnaissance après un délai long ne bénéficie pas d'une présentation additionnelle des stimuli pouvant biaiser les résultats. Les résultats de l'étude de Waring et Kensinger (2009) ont révélé une interaction entre la valence émotionnelle et l'arousal après un délai court (i.e., 10 minutes). La reconnaissance était supérieure pour les images de valence positive par rapport à celles de valence négative uniquement lorsqu'elles étaient associées à un arousal élevé. À l'inverse, les images de valence négative étaient mieux reconnues lorsqu'elles étaient associées à un arousal faible. En revanche, après un délai long (i.e., 24 heures), seuls des effets simples de l'arousal et de la valence émotionnelle ont été retrouvés. Les images de valence négative étaient mieux reconnues que celles de valence positive et les images d'arousal élevé étaient mieux reconnues que celles d'arousal faible. Enfin, les performances étaient meilleures après un délai long qu'après un délai court. Ces résultats confirment tout d'abord notre hypothèse selon laquelle une interaction entre les deux dimensions émotionnelles serait retrouvée après un délai court et non après un délai long. De plus, cette amélioration des performances de mémoire émotionnelle avec le délai, également retrouvée par d'autres études (Schumann et al., 2018 ; Sharot et al., 2007), suggère de nouveau que les dimensions émotionnelles influencent et renforcent le processus de consolidation.

D'autres études ont relevé un rehaussement émotionnel de la mémoire pour les stimuli émotionnels après un délai long, mais pas après un délai court (Pierce & Kensinger, 2011 ; Sharot & Phelps, 2004 ; Sharot & Yonelinas, 2008). Les stimuli émotionnels ne sont pas significativement mieux reconnus que les neutres en délai immédiat, mais ils seraient par la suite plus résistants à l'oubli. L'avantage mnésique pour les stimuli émotionnels par rapport aux stimuli neutres augmenterait donc avec l'allongement du délai. Dans leur revue, Yonelinas & Ritchey (2015) expliquent que les résultats de ces études n'excluent pas la possibilité que des avantages liés aux émotions puissent être observés dès un délai court, mais qu'ils dépendraient de certains facteurs lors de l'encodage tel que le niveau attentionnel. Au final, alors que la mémoire non émotionnelle serait progressivement affectée par un phénomène d'oubli (Ebbinghaus, 1885), toutes ces études suggèrent que les stimuli émotionnels seraient plus résistants, voire même mieux reconnus après un délai de rétention plus long, grâce aux effets des émotions sur le processus de consolidation.

Seule l'étude de LaBar & Phelps (1998), à notre connaissance, a testé l'effet du délai sur les performances de mémoire émotionnelle de patients présentant une lésion du LT immédiatement après la phase d'encodage puis une heure après. Tandis qu'aucun effet du délai sur la mémoire émotionnelle n'a été mis en évidence chez les patients, le rappel des mots d'arousal élevé chez les participants contrôles augmentait avec le délai. Un renforcement de la consolidation mnésique pour les stimuli d'arousal élevé est donc retrouvé chez les participants contrôles, mais pas chez les patients. Cela suggère la nécessité de l'intégrité du lobe temporal pour la consolidation en mémoire des stimuli d'arousal élevé. De plus, il est à noter que malgré l'absence d'amélioration de rappel des mots d'arousal élevé avec le délai chez les patients, leur rappel restait supérieur à celui des mots d'arousal faible. Selon les auteurs, la discordance entre ces résultats et ceux de Åhs et al. (2010) et Pouliot & Jones-Gotman (2008) n'ayant pas mis en évidence d'effet de l'arousal chez les patients, s'explique par le fait que les mots d'arousal élevé formeraient une catégorie sémantique plus homogène que les mots neutres et qu'un traitement catégoriel ne reposerait pas sur le lobe temporal. Quant à la valence émotionnelle, son impact sur le processus de consolidation reste à investiguer chez les patients présentant une lésion du LTM.

### 3. Mémoire émotionnelle musicale

Afin d'approfondir la compréhension de l'effet bénéfique des émotions sur la mémoire, l'étude d'un matériel capable de générer des émotions fortes et variées chez tout individu est nécessaire. En tant qu'activité humaine agréable et omniprésente dans toutes les cultures, la musique semble être un support privilégié pour examiner cette question (Fritz et al., 2009 ; Juslin, 2019, 2019 ; Peretz et al., 2010 ; Vieillard et al., 2008). Pourtant, peu d'études ont examiné l'influence des émotions sur la mémoire musicale et encore moins ont pris en compte l'arousal et la valence émotionnelle.

#### 3.1. Population témoin

##### 3.1.1. Effets de l'arousal et de la valence

Une des premières études sur la mémoire émotionnelle musicale à avoir pris en compte les niveaux d'arousal et de valence des extraits musicaux est celle de Eschrich et al. (2005). Dans cette étude, les participants devaient évaluer des extraits de piano en termes d'arousal, de valence et de force émotionnelle. Lors de la phase de reconnaissance réalisée deux semaines après la phase d'encodage, les extraits musicaux les mieux reconnus étaient associés à un jugement d'arousal élevé et de valence positive. Dans une étude ultérieure, Eschrich et al. (2008) ont présenté lors d'une tâche d'encodage des extraits de musiques de film dont la valence variait de très positive à moins positive. Les extraits ont été écoutés une première fois puis une seconde fois le lendemain. Les résultats, obtenus lors de la tâche de reconnaissance réalisée le troisième jour, ont montré que les performances de reconnaissance étaient les meilleures pour les extraits jugés très positifs par rapport à ceux jugés comme moins positifs. En revanche, les extraits musicaux jugés comme étant d'arousal élevé n'étaient pas mieux reconnus que ceux jugés comme étant d'arousal faible. Dans une étude de neuroimagerie fonctionnelle, Altenmüller et al. (2014) ne semblent pas avoir répliqué ces résultats comportementaux. En reprenant les mêmes extraits que Eschrich et al. (2008), les auteurs n'ont pas retrouvé d'effet de la valence positive sur les performances de reconnaissance évaluées après un délai de 24 heures. Par rapport à la précédente étude, les extraits musicaux n'ont été présentés qu'une seule fois lors de la tâche d'encodage. L'exposition unique des participants aux extraits musicaux peut avoir été insuffisante pour induire une amélioration de la mémoire, expliquant ainsi l'absence de résultats. Une autre explication possible est la différence du type d'apprentissage utilisé, avec un apprentissage massé dans l'étude d'Altenmüller et al. (2014)

et un apprentissage distribué dans l'étude d'Eschrich et al. (2008). Enfin, ces deux études ont utilisé uniquement du matériel à valence positive, ce qui ne permet pas de se prononcer sur l'effet de la valence négative ou d'une éventuelle interaction avec l'arousal.

Une série d'études dans le domaine de la mémoire musicale a eu recours au set de musiques de Vieillard et al. (2008). Ces extraits composés par ordinateur dans le style de musique de film induisent des émotions de joie, de peur, de tristesse ou encore d'apaisement. Même si ces études se réfèrent à l'approche catégorielle des émotions, leurs résultats permettent également d'examiner les effets des dimensions émotionnelles sur la mémoire. En effet, l'émotion de joie correspondrait à un niveau élevé d'arousal et à une valence positive, la peur à un niveau élevé d'arousal et à une valence négative, la tristesse à un niveau faible d'arousal et à une valence négative et enfin l'apaisement à niveau faible d'arousal et à une valence positive (Russell, 1980 ; Vieillard et al., 2008). Ainsi, plusieurs études ont testé la reconnaissance de ces extraits musicaux après un court délai (Aubé et al., 2013 ; Narme et al., 2016 ; Vieillard & Gilet, 2013) ou après un délai plus long de 24 heures (Samson et al., 2009). À l'exception de l'étude de Narme et al. (2016) qui n'a pas démontré d'effet de la catégorie émotionnelle sur la reconnaissance musicale chez de jeunes adultes, les autres études ont montré une meilleure reconnaissance des extraits musicaux exprimant la peur (i.e., arousal élevé et valence négative) et, dans une certaine mesure, la joie (i.e., arousal élevé et valence positive) (Aubé et al., 2013 ; Samson et al., 2009 ; Vieillard & Gilet, 2013). Cela suggère un bénéfice pour les stimuli d'arousal élevé. Toutefois, ce résultat doit être interprété avec prudence. Comme l'a démontré l'étude de Samson et al. (2009), le niveau de dissimilarité entre les musiques de peur était plus élevé que celui des trois autres catégories émotionnelles. De ce fait, la dissimilarité entre les stimuli cibles et les stimuli distracteurs était plus importante pour les extraits de peur. Cette différence pourrait expliquer, du moins en partie, les scores de reconnaissance supérieurs obtenus avec les extraits musicaux de peur par rapport aux trois autres types d'extraits (i.e., joie, tristesse, apaisement). En revanche, le score de reconnaissance élevé obtenu avec les extraits musicaux de joie en particulier après un délai de 24 heures, pourrait néanmoins refléter un effet cumulé de l'arousal ou de la valence sur la consolidation de la mémoire musicale. Cependant, ces résultats ne permettent pas de conclure avec certitude sur l'effet des dimensions émotionnelles sur la mémoire, les extraits de ces études ayant été validés selon l'approche catégorielle puis seulement distingués en termes d'arousal et de valence émotionnelle.

### 3.1.2. Effet du délai

L'étude d'Alonso et al. (2015) est, à notre connaissance, la seule à avoir manipulé conjointement les niveaux d'arousal et de valence émotionnelle d'extraits musicaux ainsi que le délai séparant la phase d'encodage et la phase de reconnaissance. Ainsi, l'interaction des deux dimensions émotionnelles sur la mémoire musicale et notamment sur le processus de consolidation a pu être testée. Pour cela, les participants écoutaient des extraits de symphonies non familières dont l'arousal et la valence avaient été préalablement contrôlés. Les auteurs avaient croisé le niveau d'arousal et le niveau de valence émotionnelle de chaque extrait musical afin d'obtenir 4 combinaisons émotionnelles (i.e., combinaison que l'on peut associer aux quatre catégories émotionnelles) : arousal élevé et valence positive, arousal élevé et valence négative, arousal faible et valence positive et arousal faible et valence négative. Une tâche de reconnaissance était réalisée immédiatement après la tâche d'encodage, puis de nouveau après un délai de 24 heures. Dans la condition immédiate, une interaction entre les deux dimensions émotionnelles sur les performances de reconnaissance a été retrouvée. Alors que la valence émotionnelle n'avait pas d'effet sur la reconnaissance des stimuli d'arousal élevé, elle modulait la reconnaissance des stimuli d'arousal faible, les musiques positives étant mieux reconnues que les négatives. En revanche, dans la condition différée (i.e., délai de 24 heures), des effets indépendants de l'arousal et de la valence émotionnelle ont été rapportés. Les extraits d'arousal élevé étaient mieux reconnus que ceux d'arousal faible et les extraits de valence négative étaient mieux reconnus que ceux de valence positive. Ces résultats suggèrent de nouveau la présence d'une interaction entre les dimensions émotionnelles après un délai court entre la phase de reconnaissance et la phase d'encodage et la présence d'effets indépendants de l'arousal et de la valence émotionnelle après un délai long. De plus, ces résultats suggèrent un avantage mnésique des stimuli de valence positive après un délai court et un avantage pour ceux de valence négative après un délai long. La valence émotionnelle affecterait donc différemment les performances de reconnaissance d'extraits musicaux selon le délai de rétention. Ce résultat suggère que les processus de consolidation mnésique semblent moduler les effets de la valence émotionnelle sur la mémoire musicale. Cependant, dans cette étude, lors de la tâche de reconnaissance après un délai long, les stimuli cibles, déjà présentés lors de la tâche de reconnaissance après un délai court, sont de nouveau présentés. De ce fait, les deux tâches de reconnaissance ne sont pas équivalentes, la condition de reconnaissance après un délai long bénéficiant d'une présentation additionnelle des stimuli. Il est donc difficile de

dissocier l'effet du délai de celui du nombre de présentations sur les performances de reconnaissance.

### 3.2.Population clinique avec une lésion du lobe temporal

Seule l'étude de Samson et al. (2009), dont les données auprès des participants contrôles ont été précédemment présentées (voir section 2.1), a évalué la mémoire émotionnelle d'extraits musicaux chez des patients présentant une épilepsie du lobe temporal. Cette évaluation a été réalisée au cours d'une investigation pré-chirurgicale impliquant des enregistrements électroencéphalographiques intra-cérébraux (Omigie et al., 2014). Dans cette étude, lors de la phase d'encodage réalisée de manière incidente, les patients écoutaient les extraits musicaux tirés du set de Vieillard et al. (2008) générant des émotions de joie, d'apaisement, de peur ou de tristesse. Après chaque extrait, les participants devaient réaliser un jugement émotionnel qui consistait à identifier l'émotion correspondant à l'extrait musical à l'aide d'un paradigme de classification à choix multiple (i.e., *multiple-choice classification paradigm*). Après un délai de 24 heures, les performances de reconnaissance des patients et des participants contrôles ne différaient pas pour les émotions de joie, d'apaisement et de tristesse. En revanche, la reconnaissance des musiques générant de la peur était déficitaire chez les patients. De plus, alors qu'une amélioration de la mémoire pour les extraits musicaux de peur ou de joie, correspondant à un niveau d'arousal élevé, par rapport aux extraits musicaux d'apaisement et de tristesse, correspondant à un niveau faible d'arousal, a été rapportée chez les participants contrôles (voir section 2.1), cette amélioration n'a pas été observée chez les patients. Selon les auteurs, ce déficit spécifique de mémorisation de musiques induisant une émotion de peur s'expliquerait par un déficit de jugement de cette émotion retrouvé chez ces patients qui serait lié au dysfonctionnement de l'amygdale (Gosselin et al., 2005, 2007). Ces résultats suggèrent également que les patients bénéficieraient toujours de l'effet de la valence émotionnelle contrairement à celui de l'arousal. Ces résultats étant retrouvés après un délai long de 24 heures suggèrent de nouveau que les dimensions émotionnelles influencent également le processus de consolidation des patients présentant une épilepsie du lobe temporal. Enfin, l'absence de déficit de mémoire musicale, excepté pour les stimuli musicaux de peur, contraste avec les troubles sévères de la mémoire verbale retrouvée chez ces patients. En effet, les patients avaient obtenu des performances d'apprentissage verbal et de rappel différé à 24 heures très faibles au test d'apprentissage de mots abstraits (Jones-Gotman et al., 1997). Ces résultats suggèrent donc que la mémoire musicale, grâce aux émotions générées, serait peut-être moins affectée que la mémoire verbale en présence d'une épilepsie du lobe temporal. De

plus, il est à noter que par rapport aux autres études rapportées dans ce chapitre ayant testé des patients après leur chirurgie de l'épilepsie, cette étude porte sur des patients avant leur chirurgie et donc présentant toujours des crises d'épilepsie. Sachant que la présence de crises serait liée à de moins bonnes performances mnésiques, nous pouvons supposer que la mémoire émotionnelle de ces patients après leur chirurgie s'améliorerait et que les effets des dimensions émotionnelles seraient plus marqués.

Pour conclure cette section sur l'effet des émotions sur la mémoire épisodique, il semble qu'une certaine cohérence apparaisse entre les résultats obtenus dans le domaine musical et non musical pour ce qui est de l'effet de l'arousal sur la mémoire avec une meilleure reconnaissance des stimuli d'arousal élevé chez les adultes sains. En revanche, selon le type de matériel, des divergences sont retrouvées entre les études évaluant l'effet de la valence sur la mémoire. Alors que dans le domaine non musical, de nombreuses études s'accordent sur un bénéfice plus important de la valence négative sur la mémoire, il n'en est pas de même dans le domaine musical, les résultats étant même souvent contradictoires. Enfin, une interaction entre l'arousal et la valence dans les domaines non musical et musical semblerait être mise en évidence seulement après un délai court séparant la phase d'encodage et la phase de reconnaissance. Cependant, cette interaction ne se manifeste pas de la même manière entre les études. Ainsi, l'existence d'une interaction entre l'arousal et la valence émotionnelle est encore controversée et pourrait dépendre du délai de rétention. De plus, la seule étude dans le domaine musical ayant testé l'interaction entre l'arousal et la valence émotionnelle présente la limite de ne pas avoir contrôlé le nombre de présentations entre les tâches de reconnaissance. En comparaison, la mémoire émotionnelle a été relativement peu étudiée chez les patients présentant une lésion du LTM. Les quelques études ayant eu recours à du matériel musical suggèrent que, comme dans le domaine non musical, les patients bénéficieraient toujours de l'effet de la valence émotionnelle sur leurs performances mnésiques, mais plus de celui de l'arousal. Ainsi, beaucoup de questions concernant l'impact des dimensions émotionnelles et de leur interaction sur la mémoire musicale et notamment le processus de consolidation restent sans réponse auprès des adultes sains ainsi que chez les patients présentant une lésion du LTM.



## Objectifs de la thèse et questions de recherche

Comme développé précédemment, de nombreuses études ont révélé un bénéfice des émotions sur la mémoire résultant, en partie des interactions entre l'amygdale, zone cérébrale impliquée dans le traitement émotionnel, et l'hippocampe et ses cortex adjacents sur lesquels reposent les processus mnésiques (LaBar & Cabeza, 2006 ; Yonelinas & Ritchey, 2015). Cependant, ce bénéfice des émotions sur la mémoire a majoritairement été étudié avec des images ou des mots. Or, en tant qu'activité humaine agréable et omniprésente dans toutes les cultures et capable de générer des émotions fortes et variées, la musique semble être un support privilégié pour examiner cette question. De plus, bien qu'une partie de la littérature ait abordé les émotions selon l'approche dimensionnelle (Russell, 1980), les deux dimensions d'arousal et de valence émotionnelle ne sont pas toujours conjointement manipulées et leur interaction n'a été que rarement testée. Enfin, trop peu d'études ont modulé les délais séparant la présentation des stimuli émotionnels et les tâches de mémoire afin d'étudier l'impact des émotions sur le processus de consolidation mnésique. Ce dernier, souvent altéré lors du vieillissement ou en présence d'une lésion cérébrale, renvoie à la stabilisation progressive du souvenir (Malle et al., 2015 ; Mameniškienė et al., 2020 ; Tramoni-Negre et al., 2017). Parvenir à renforcer ce processus grâce aux émotions musicales permettrait d'améliorer les performances mnésiques à long terme des patients.

L'objectif de cette thèse est d'évaluer l'impact de l'arousal et de la valence émotionnelle sur la mémoire musicale et d'améliorer nos connaissances sur le rôle du lobe temporal dans le processus de consolidation des informations musicales émotionnelles en étudiant les performances de patients ayant bénéficié d'une résection du lobe temporal médian incluant l'amygdale et l'hippocampe par comparaison à des adultes sains.

L'**Article I** (Nineuil et al., 2020) évaluera l'impact des dimensions émotionnelles sur la mémoire musicale d'adultes sains en comparant les effets de l'arousal (faible ou élevé) et de la valence (positive ou négative) sur la reconnaissance d'extraits musicaux. Afin d'améliorer notre compréhension de la façon dont les dimensions émotionnelles influencent la mémoire musicale, et notamment le processus de consolidation, nous utiliserons un paradigme permettant de comparer les performances mnésiques après un court délai (i.e., 15 minutes) et un long délai (i.e., 24 heures) de rétention.

L’**Article II** (Nineuil et al., 2022) présentera les normes affectives françaises d’une série d’extraits musicaux issus du *Film Music Stimuli Set* (Eerola & Vuoskoski, 2011) selon l’approche dimensionnelle à deux dimensions. Cet ensemble de données est constitué d’extraits de musique de film, style connu pour déclencher de fortes émotions (Cohen, 2011). De plus, cette série d’extraits ayant déjà été validée auprès d’une population finlandaise et espagnole, une comparaison entre les évaluations émotionnelles obtenues dans ces différents pays et selon différents modes de passation (i.e., présentiel, distanciel) sera réalisée afin de tester la robustesse de nos résultats.

L’**Article III** (Nineuil et al., en préparation) évaluera l’effet d’une lésion du lobe temporal médian, incluant l’amygdale et l’hippocampe, sur la mémoire à long terme d’extraits musicaux variant selon les dimensions d’arousal et de valence émotionnelle. Pour cela, les performances de reconnaissance musicale de patients ayant bénéficié d’une résection du lobe temporal médian gauche ou droit seront comparées à celles d’adultes sains. Cette étude reprendra le paradigme de l’Article I tout en lui apportant quelques modifications afin d’augmenter l’effet des dimensions émotionnelles sur la mémoire et utilisera les extraits musicaux de l’Article II. À cause de la pandémie de COVID-19, nos passations se déroulant à l’Hôpital de la Pitié-Salpêtrière (Paris) ont été stoppées et ont dû être réalisées en téléconsultation.

Le recrutement des patients dans nos études ayant été interrompu durant les périodes de confinement causées par la pandémie de COVID-19, nous avons réalisé une étude à partir d’une base de données disponible à l’Hôpital de la Pitié-Salpêtrière (Paris). Ce travail a permis d’examiner la question du traitement émotionnel chez les patients présentant une épilepsie du lobe temporal sous un angle différent. Ainsi, dans l’**Article IV** (Nineuil et al., soumis), nous évaluerons l’impact de l’intensité émotionnelle sur la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles chez cette population par rapport à des adultes sains. Nous comparerons également l’effet de la localisation et de la latéralisation du foyer épileptique sur la reconnaissance des expressions faciales chez des patients présentant une épilepsie du lobe temporal médian associée ou non à une sclérose hippocampique, ou une épilepsie du lobe temporal latéral, tout en contrôlant les effets des variables démographiques et cliniques.

Enfin, l’ensemble des résultats sera discuté au regard de la littérature et des perspectives de recherche seront élaborées (**Discussion générale et perspectives**).



# PARTIE EXPÉRIMENTALE



# ARTICLE I: The impact of emotion on musical long-term memory<sup>1</sup>

**Clémence Nineuil<sup>1</sup>, Delphine Dellacherie<sup>1,2</sup> and Séverine Samson<sup>1,3</sup>**

1. Univ. Lille, ULR 4072 - PSITEC - Psychologie : Interactions Temps Émotions Cognition, F-59000, Lille, France
2. University Hospital of Lille, Department of Pediatric Neurology, 2 Av. Oscar Lambret, F-59037, Lille, France
3. AP-HP, GH Pitié-Salpêtrière-Charles Foix, Unité d'Epileptologie, F-75013, Paris, France

---

<sup>1</sup> Travaux ayant donné lieu à une publication :

**Nineuil, C., Dellacherie, D., & Samson, S. (2020).** The Impact of Emotion on Musical Long-Term Memory. *Frontiers in Psychology, 11*, 2110. [doi: 10.3389/fpsyg.2020.02110](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.02110)

Travaux ayant donné lieu à des communications :

**Nineuil, C., Dellacherie, D., & Samson, S. (2020, reportée en 2021 pour raisons sanitaires).** *Impact of emotion on musical memory consolidation.* Communication affichée lors du congrès international Neurosciences and Music VII, Aarhus, Danemark.

**Nineuil, C., Dellacherie, D., & Samson, S. (2019).** *L'émotion musicale : la clé d'une meilleure mémorisation ?* Communication orale lors de la 14ème Journée Scientifique des Jeunes Chercheurs (JSJC), Lille, France.

**Nineuil, C., Dellacherie, D., & Samson, S. (2019).** *L'impact des émotions sur la mémoire musicale et verbale.* Communication orale lors de la Journée « Musique & Cerveau – Soigner au diapason » organisée par l'Association « Ciel ! Mon serment ! », Rouen, France.

**Nineuil, C., Dellacherie, D., & Samson, S. (2019).** *L'impact des émotions sur la mémoire musicale et verbale.* Communication affichée lors du 60ème congrès annuel de la Société Française de Psychologie (SFP), Poitiers, France.

**Abstract:**

The influence of emotional dimensions such as arousal and valence on memory has been a topic of particularly intense inquiry. As stimuli go, music is capable of provoking strong emotional responses from listeners, which can in turn influence memory. However, few studies have examined the effect of musical emotions on memory, and even fewer the effect of valence and arousal. In order to shed light on the ways in which emotional dimensions affect musical memory as study-test delay intervals increase, we tested recognition after a short delay and after a long delay. In line with the literature, we hypothesized an emotional enhancement of music memory induced by post-encoding processes leading to better recognition of musical excerpts in delayed condition, as compared to the immediate condition. The effects of arousal and valence were expected to become exaggerated after a long delay. We also predicted that the two emotional dimensions would be differently affected by the study-test intervals. Our results showed that the emotional enhancement of memory depends upon the valence, with remembering of positive and negative stimuli being differently affected by the duration of the study-test delay interval. Furthermore, our data demonstrated that musical excerpts were better recognized after a long delay than after a short delay, illustrating that memory consolidation for musical information is taking place during the long study-test interval. Moreover, musical memory consolidation is strongly related to the characteristics of the positive valence, which have been discussed in relation to its pleasantness. This original finding provides new insights into the modulatory effects of emotional valence on memory consolidation and could offer promising therapeutic possibilities for the rehabilitation of memory disorders.

**Keywords:** emotion, musical memory, consolidation, valence, arousal

## 1. Introduction

Emotional events from our life are more likely to be later recollected than similar, non-emotional events. This emotional enhancement of memory has been extensively studied using words and pictures (for review, see Yonelinas and Ritchey, 2015). Fewer studies have however examined the influence of emotion on musical memory. And yet, the emotional power of music is well established (Koelsch, 2014), and musical memory may in fact benefit from such emotional enhancements, explaining why certain pieces of music frequently become unforgettable. Is this related to the particularly efficient post-encoding processes involved in memorizing musical information? In order to investigate this question, we examined musical memory abilities in adult listeners by manipulating the emotional characteristics of musical excerpts and the lengths of time separating the study phase and a recognition test.

Emotion theorists often take the position that affective experience can be described according to two orthogonal dimensions, namely arousal and valence (Russell, 1980). Arousal refers to a continuum ranging from calm to excitement, whereas valence is measured along a continuum ranging from positive to negative. The impact of these emotional dimensions on different forms of memory, including declarative (explicit) memory, has been explored at great length. In particular, evidence has shown that high-arousal information is better remembered than low-arousal information (for review, see Hamann, 2001) in immediate (Bradley et al., 1992) or delayed memory tests administered after one day (Hu et al., 2006), a year (Bradley et al., 1992) or several years (Wagner et al., 2006). By increasing attention and elaboration at time of encoding, high-arousal stimuli are thought to be more deeply processed than low-arousal stimuli. Their memory trace would be subsequently enhanced by post-encoding processes, including stress hormone release, leading to better consolidation over a long period of time (Hamann, 2001; Payne et al., 2008; Sharot and Phelps, 2004; Sharot and Yonelinas, 2008). Emotional valence has also been reported to influence memory, with stimuli with a negative or positive valence being better memorized than neutral stimuli (Cabeza and Dolcos, 2002; Ely et al., 1999; Mickley and Kensinger, 2008). Furthermore, remembering negative information yielded even higher memory performance than remembering positive information, whether using pictures (Comblain et al., 2004; Waring and Kensinger, 2009) or words (Inaba et al., 2005; for review, see Kensinger, 2007). This effect would persist over days (Denburg et al., 2003; Kensinger, 2007; Waring and Kensinger, 2009) or weeks (Ely et al., 1999; Ochsner, 2000; Pierce and Kensinger, 2011), suggesting a negativity bias in emotional memory, at least

in young adults. Few studies have conjointly manipulated arousal and valence within a single experiment. In some cases, valence and arousal had their own respective effects on memory. Arousing pictures were better remembered than non-arousing ones and negative pictures were better memorized than positive ones (Comblain et al., 2004). In other investigations, the effect of arousal on memory performance was found to be modulated by valence (Kensinger, 2008; Li et al., 2018). However, although studies show interaction effects, the nature of the interaction differs. This interaction and its impact on memory performance are still debated in the behavioural literature (Dolcos et al., 2004; Ochsner, 2000). However, the joint effect of valence and arousal on recognition has been demonstrated in numerous neuroimaging studies, suggesting that these two dimensions influence memory through distinct neural mechanisms (Dolcos et al., 2004; Kensinger and Corkin, 2004). These results therefore justify the importance of considering these two dimensions in studies exploring the impact of emotions on memory.

Interestingly, prior investigations suggest that the emotional characteristics of stimuli may shape the retention of information differently over long delays, compared with short delays. In some studies, emotional enhancement was observed after a long delay, but not a short delay (Yonelinas and Ritchey, 2015). In other cases, the effects of arousal on memory were enhanced after a long delay, relative to a shorter one (Kensinger, 2009; Payne et al., 2008; Sharot and Phelps, 2004; Sharot and Yonelinas, 2008). Finally, Waring and Kensinger (2009) reported a complex interaction between all these factors in a visual scene recognition task. After a short delay, they showed that the level of arousal modulated the effect of valence on memory. Thus, an emotional enhancement of memory was observed in all conditions, except for positive low-arousal scenes, at least in young adults. After a long delay, the pattern of results was different. The enhancement of memory was greater for negative than for positive scenes, and greater for arousing than for non-arousing scenes underlying once more the negativity bias and the effect of arousal in emotional memory. Furthermore, the emotional enhancement effect was greater after a long than a short delay, emphasizing the role of post-encoding processes in memory consolidation of emotional information. Taken as a whole, extant literature underlines the complex interplay between emotional features of stimuli and study-test intervals, and how memory performance can be shaped by post-encoding actions.

An absence of agreement persists among musical domain scholars about how these factors contribute to the emotional memory for music. Indeed, as an enjoyable human activity

that is present in all cultures, capable of generating strong and varied emotions, it seems to be a privileged medium for studying this effect. One series of studies used the exact same prototypal clips intended to express happy, fearful, peaceful, or sad emotions, emotional characteristics which had been validated previously (Gosselin et al., 2005; Vieillard et al., 2008). Musical recognition of these four emotional categories of computer-generated MIDI musical excerpts was generally assessed after a short delay (Aubé et al., 2013; Narme et al., 2016; Vieillard and Gilet, 2013), though sometimes after a longer delay of 24 hours (Samson et al., 2009). Except for one study that did not report any difference in explicit recognition, at least in young adults (Narme et al., 2016), the other investigations showed better recognition of musical clips expressing fear and, to some extent, happiness (Aubé et al., 2013; Samson et al., 2009; Vieillard and Gilet, 2013), suggesting a benefit for high-arousal stimuli. However, this finding should be interpreted cautiously, as it could be explained by different levels of difficulty between recognition of high and low-arousing musical excerpts, or of each prototypical emotional category. As demonstrated by a control study (Samson et al., 2009), the perceptual distinctiveness (or dissimilarity) between the scary music was larger than the distinctiveness between the three other categories, explaining, at least in part, the superior recognition scores obtained with scary musical excerpts. However, the high recognition score obtained with happy musical excerpts, in particular after a 24-hour delay, might nonetheless reflect the effect of arousal and/or valence on consolidation of musical memory, though it is too early to draw any firm conclusions.

Other studies reported in the literature have used instrumental classical music. Eschrich et al., (2005) examined the relationship between emotion and music recognition. In this study, piano pieces by Bach were rated in terms of arousal (from very pacifying to very arousing) and valence (from negative to positive valence) during encoding. Recognition tests conducted two weeks later revealed that well-recognized pieces were associated with higher arousal ratings and received a higher positive valence rating. In a subsequent study, symphonic film music eliciting positive feelings (i.e., little positive to very positive) were repeated twice over different days (Eschrich et al., 2008). The authors confirmed an effect of valence on recognition with better memory for very positive music excerpts than for less positive ones, although no effect of arousal on recognition was obtained in this case. These findings suggest that emotional valence, as rated by the participants, appears to influence long-term memory for music, underlying once more the impact of positive valence music on memory consolidation. However, the lack of negative valence music in this study limits the interpretation of the results. By

addressing again this question in a neuroimaging study, the authors failed to replicate their previous finding (Altenmüller et al., 2014). Participants' single exposure to the musical pieces during encoding may have been insufficient to induce a memory enhancement, thereby explaining the lack of behavioural results. Based on all these data, it remains unclear whether only positive valence, or both positive and negative valence, provides a memory advantage.

Prior investigations into emotional memory in music have assessed memory at only one delay. To our knowledge, in the music domain, only one study has examined the effects of delay interval upon emotional memory (Alonso et al., 2015). Making use of the parsimonious model of emotion, which defines emotional spectrum into two dimensions, its authors manipulated valence and arousal levels in symphonic musical excerpts. Participants were requested to rate these two emotional feelings induced by listening to music before taking two recognition memory tests administered immediately after and 24 hours after the study session. The results indicated that arousal and valence interacted differently with memory performance at each study-test delay. In immediate recognition, the effect of valence varied as a function of arousal. Whereas valence did not interfere with the remembering of high-arousal excerpts, it did modulate recognition of low-arousal stimuli such that positive excerpts were better recognized than negative excerpts. In contrast, in the delayed condition, the results revealed no interaction between the two emotional dimensions. Only independent effects of arousal and valence were reported, such that high-arousal excerpts and negative excerpts were better memorized than low-arousal and positive ones, respectively, confirming the memory advantage for high arousing and negative stimuli already reported in non-musical domains (Ochsner, 2000; Waring and Kensinger, 2009). Unlike findings obtained with words and pictures, there was no loss of memory in delayed, as compared to immediate recognition, indicating no deleterious impact of delay interval in music. Yet this recognition test, frequently used in psychology, presents a methodological bias. By presenting the target stimuli once again in the delayed recognition test, this condition benefits from an additional exposure compared to the immediate condition. It is therefore difficult to disentangle the effect of delay from the effect had by number of presentations in post-encoding processes.

To overcome this methodological limit and to clarify the ways emotional dimensions (i.e., valence and arousal) affect musical memory as study-test delay intervals increase, we designed a new study using the symphonic musical excerpts selected by Alonso et al. (2015). However, we manipulated the study-test interval while keeping the number of exposures

constant. For this purpose, the encoding phase was distributed over two distinct sessions, one session on Day 1 allowing the first half of the target stimuli to be encoded, and the other session on Day 2 allowing the other half to be encoded. Immediately after this second session on Day 2, a recognition test including all target stimuli mixed with foils was presented. The recognition of the target stimuli presented just before (on Day 2) or after 24 hours (on Day 1) provided respective memory performances after a short and a long-delay retention without changing the number of exposures to the targets. In line with the literature, we hypothesized an emotional enhancement of music memory induced by post-encoding processes leading to better recognition of musical excerpts in delayed condition as compared to immediate one. The effects of arousal and valence should become exaggerated after a long delay. Finally, we also predicted that the two emotional dimensions would be differently affected by the study-test intervals.

## 2. Methods

### 2.1. Participants

Eighty native French speakers took part in this study (mean age =  $34.09 \pm 7.20$ ; 37 females and 43 men). In accordance with the Music Expertise Questionnaire (Ehrlé, 1998), 43 participants had no musical expertise and 37 were musicians. The quality and quantity of sleep was also assessed twice using the St. Mary's Hospital Sleep Questionnaire (Ellis et al., 1981; mean duration of sleep, night 1 =  $7.48 \pm 1.61$ , night 2 =  $7.57 \pm 1.41$ ). No participants reported a history of psychiatric or neurological disorders, alcoholism, or present treatment with centrally acting medications. Participants were screened for the presence of mood disorders using the Profile of Mood State (POMS; Shacham, 1983; mean score for anxiety =  $4.42 \pm 3.57$ , depression =  $2.65 \pm 2.55$ , confusion =  $2.00 \pm 3.79$ , anger =  $4.03 \pm 3.15$ , tiredness =  $6.15 \pm 3.70$ , and vigor =  $11.60 \pm 3.55$ ) and for the presence of attention deficit using standardized psychometric tests: the Paced Auditory Serial Addition Test (PASAT; Mazza and Naegele, 2004; mean score =  $49.66 \pm 6.15$ ) and the WAIS-IV coding subtest (Wechsler, 2014; mean scaled score =  $11.25 \pm 12.67$ ). All participants have signed informed consent and the study was carried out following the declaration of Helsinki principles.

## 2.2. Stimuli

The musical material consisted of 32 symphonic excerpts with a duration of 5 seconds ( $\pm$  1-second fade and in fade out) already used in a previous study (Alonso et al., 2015). These excerpts were taken from different symphonies written by composers between 1830 and 1954 and were normalized to a maximal amplitude of 1.2 dB. To control the effect of familiarity, the most famous composers and symphonies of this period were excluded. Musical stimuli had been previously rated for stimulus valence (positive vs negative) and arousal levels (high vs low) to create 4 different emotional combinations in a 2 by 2 design: high-arousal and positive [A+; V+]; high-arousal and negative [A+; V-]; low-arousal and positive [A-; V+] and low-arousal and negative [A-; V-]. We selected 16 target stimuli (4 per emotional combination) and 16 distractors for the recognition test. Thus, to each target was matched to a distractor from the same emotional combination and melodic style, composed by the same composer or even excerpts from the same symphony as the target. (The list of the symphonies are presented in Alonso et al., 2015).

## 2.3. Procedure

Participants sat in front of a laptop in a quiet room and listened to the musical excerpts using stereophonic headphones. Psychopy software was used to run the experiment and to record recognition ratings. All participants were tested individually over two different sessions, with the encoding phase being split over two consecutive days. On Day 1, they listened to 8 different musical excerpts (2 stimuli per emotional combination). Participants were instructed to listen carefully to the musical excerpts because their memory would be tested later (intentional encoding). To reinforce the encoding process, the studied items were presented three times in random order. Two questionnaires were administered: the St. Mary's Hospital Sleep Questionnaire (Ellis et al., 1981) and the POMS (Shacham, 1983).

On Day 2, approximately 24 hours later, each participant listened to 8 additional musical excerpts following the same procedure used on Day 1. As with the first encoding phase, the items were presented three times. On both days, participants completed questionnaires either before or after the encoding task in a randomized manner, on day 2 the St. Mary's Hospital Sleep Questionnaire (Ellis et al., 1981) and the Music Expertise Questionnaire (Ehrlé, 1998) were administered. Then, 15 minutes after the second encoding phase, the recognition phase began. Sixteen targets, including 8 musical excerpts encoded on Day 1 and 8 musical excerpts encoded on Day 2, were randomly intermixed with 16 distractors. Participants were

told that items from the same-day study session and the study session a day earlier were intermixed with novel items. This recognition phase assessed memory recognition after short (15-minute) and long (24-hour) delays within a single test. After each presentation, participants had to decide whether they had already heard a given excerpt (Yes/No) and to assign their responses confidence ratings (sure/unsure). Participants were not given a time limit to respond. During the 15-minute delay, the participants performed standardized cognitive tests to assess auditory attention and working memory using the PASAT (Mazza and Naegele, 2004) and the WAIS-IV coding subtest (Wechsler, 2014).

## 2.4. Data Analysis

Based on the accuracy of the responses and the confidence ratings, Receiver Operating Characteristic (ROC; Yonelinas, 1994) curves have been calculated for each arousal and valence combination. Preliminary analyses were carried out to test the effects of age, sex, musical expertise and duration of sleep on the global recognition score. Then, a three-way repeated-measure analysis of variance (ANOVA) with Arousal (High/Low), Valence (Positive/Negative), study-to-test delay period (Short/Long) as well as subsequent post-hoc analysis was carried out.

## 3. Results

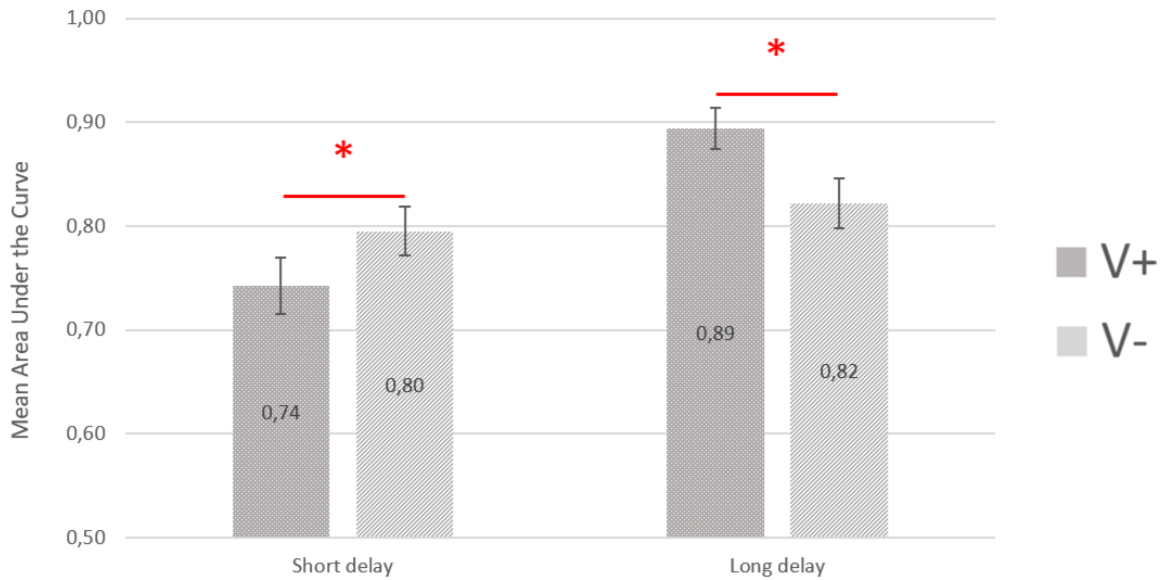
### 3.1. Preliminary analysis

These analyses showed there was no correlation between the recognition of the musical material and participants' age [ $r = -0.201$ ;  $p = 0.073$ ] or duration of sleep [ $r = -0.075$ ;  $p = 0.510$ ]. Furthermore, we found sex and musical expertise not to have an effect on the recognition test [all  $ps > 0.05$ ]. Finally, the completion of the questionnaires before or after the encoding tasks had no effect on the musical recognition ( $U = 744$ ;  $df = 78$ ;  $p = 0.593$ ).

### 3.2. Recognition task

The ANOVA with three within-subjects factors (i.e., Valence, Arousal, Delay) was carried out on the areas under the ROC curves. The analysis showed a Valence by Delay interaction [ $F(1,79) = 23.74$ ;  $p < 0.001$ ;  $\eta^2 = 0.231$ ], as depicted in **Figure 3**. Post-hoc analyses showed that after a short delay, the mean area under the curve was higher for the negatively valenced (mean  $\pm$  SD =  $0.80 \pm 0.24$ ) than for positively valenced excerpts (mean  $\pm$  SD =  $0.74 \pm 0.24$ ) [ $p < 0.05$ ]. In contrast, after a long delay, the mean area under the curve was higher for

positively valenced (mean  $\pm$  SD =  $0.89 \pm 0.18$ ) than for negatively valenced excerpts (mean  $\pm$  SD =  $0.82 \pm 0.21$ ) [ $p < 0.002$ ].



**Figure 3.** Mean areas under the ROC curve for the recognition of positive and negative musical excerpts as a function of delay (short vs long).

Notes. Origin is set at chance level (0.50). The error bars correspond to the standard error of the mean.

This ANOVA also revealed a main effect of Delay [ $F(1,79) = 43.63$ ;  $p < 0.001$ ;  $\eta^2 = 0.356$ ], with the mean area under the curve being significantly higher after long delay (mean  $\pm$  SD =  $0.85 \pm 0.11$ ) than after short delay (mean  $\pm$  SD =  $0.76 \pm 0.13$ ). No main other effect was had by Arousal [ $F(1,79) = 0.08$ ;  $p > 0.05$ ], Valence [ $F(1,79) = 0.39$ ;  $p > 0.05$ ] or interaction.

#### 4. Discussion

The objective of this study was to investigate the impact of emotional dimensions on musical memory by comparing the effects of valence (i.e., positive, negative) and arousal (i.e., low, high) on the recognition of musical excerpts. To improve our understanding about how emotional dimensions (i.e., valence and arousal) affect musical memory as study-test delay intervals increase, we compared memory performance after a short (15 minutes) and a long (24 hours) retention delay. We showed that the emotional enhancement of memory depends upon valence, with musical memory of positive and negative stimuli being differently affected by the duration of the study-test delay interval. Furthermore, our data demonstrated that musical

excerpts were better recognized after a long than after a short delay, illustrating that memory consolidation for musical information is taking place during the long study-test interval.

The main finding borne out by our study is that emotion strengthens musical memory. More specifically, we showed that emotional valence differently affected the recognition of musical excerpts after a short- and a long-delay interval. Whereas remembering of musical excerpts is higher for negative than for positive stimuli after a short delay, the reverse was observed after a long delay. Thus, the memory performance for stimuli associated with positive valence was not only higher than for negative ones, but improved after a 24-hour delay, which was not the case for the negative stimuli. The fact that emotional enhancement on musical memory varies as a function of study-test delay intervals confirmed our predictions, and is compatible with previously reported results (Alonso et al., 2015). It suggests that post-encoding processes, including consolidation that transforms newly formed memories from a fragile state to a more permanent state, modulated the effects of emotion upon musical memory. However, the discrepancies between the pattern of results obtained in the current study and that of our previous study with Alonso et al. (2015) raised several questions worth discussing.

By examining the impact of aging on emotional musical memory, Alonso et al. (2015) found that valence interacted with arousal when recognition was assessed after a short delay. Whereas valence had no impact on the recognition of high-arousal stimuli, it did affect low-arousal stimuli, with positive valence music being better remembered than negative valence music. After a long delay, only the effects of valence and arousal were demonstrated, with negative valence stimuli being better recognized than positive ones, and high-arousal stimuli better recognized than low-arousal stimuli. The different result profiles obtained after short and long-delay intervals in Alonso et al.'s study and in the present study are surprising, since both used the exact same set of stimuli. The apparent discrepancies between the studies might nonetheless be due to methodological differences. In Alonso et al. (2015), ratings of emotional dimensions were requested during the first exposure to the musical excerpts, whereas in the present study, no specific instructions were given at the time of encoding. By asking participants to rate valence and arousal, attention devoted to the emotional meaning of the stimuli might have induced deeper encoding processes than in the present study. As previously discussed in the literature (Everaert et al., 2011; Greenberg et al., 2012), when participants are particularly attentive to emotion, the effects of arousal on memory are more likely to appear. Such a memory enhancement for arousing stimuli can be even greater after long study-test

delay periods than after short ones (Sharot and Phelps, 2004; Sharot and Yonelinas, 2008), at least when emotional stimuli (i.e., words or pictures) were compared with neutral stimuli. Taken as a whole, these results underline the importance of the depth of encoding in emotional memory. Unlike verbal or visual information, the concept of neutral emotion does not really exist in music, which is intrinsically emotional. Thus, music is defined as the language of emotion and is rarely perceived as non-emotional. Rather than "neutral" music, Dellacherie and collaborators (2008) have proposed "ambiguous" music, that is, when the emotional cues are insufficient to evoke a specific emotion. Since the concept of neutral emotion in music is questionable, we deliberately used only emotional musical excerpts in the current study as in Alonso et al. (2015). However, a fruitful avenue for future research may be to modify the encoding instructions in order to improve use of controlled cognitive mechanisms and provide an opportunity for sustained attention effects to influence memory. It is possible that under these conditions, an effect from arousal on musical memory would be noted, as in Alonso et al. (2015) and Eschrich et al. (2005), who both asked participants to judge arousal and valence at encoding during an intentional memory task.

Another important difference between the present investigation and Alonso et al. (2015) concerns procedure. In Alonso et al. (2015), all target stimuli were presented within a single session on Day 1, followed by two recognition tests, one proposed after a short delay and the other after a long delay. In this case, as in many classical recognition paradigms, delayed recognition performance benefited not only from a longer consolidation time but also from an additional exposure to the target stimuli, relative to immediate recognition. To overcome this methodological bias in the present study, we split the presentation of the target stimuli into two study phase sessions, with half of them being presented on Day 1 and the other half on Day 2. The memory test presented on Day 2 after the second study phase allowed us to test recognition after a short and a long delay while keeping the number of exposures constant. Instead of making participants learn the whole series of 16 target stimuli and apply them in a single block presentation, we distributed the 16 targets across two sessions, each with only 8 targets. Finally, Alonso et al., (2015) investigated a group of young adults (mean age = 22 years) with a group of elderly people (mean age = 75 years). Since they found no effect of age on performance, they mixed all the 30 participants. As a result, their participants displayed a larger age range and were globally older than participants from the present study. Despite these methodological differences in terms of the number of items to be learned and, the number of exposures, the different instructions and subjects' characteristics, it appears that negative valence stimuli were

similarly recognized after long delay in both studies (ROC=.82 in the present study; ROC=.80 in Alonso et al., 2015). However, positive valence stimuli were better recognized in the present study (ROC=.89) than in Alonso et al. (2015) (ROC=.74). This finding firstly indicates that the consolidation process improves musical memory when the number of stimuli to be learned is limited. Secondly, the decrease of performance in recognizing positive valence stimuli in Alonso et al. (2015) can also be explained by the age of the participants. However, this hypothesis seems rather improbable since the age does not seem to affect the recognition of negative valence stimuli. Moreover, it would contradict the positivity bias found in the aging process, which is described in the literature (for review see Reed et al., 2014). Finally, the advantage of positive valence over negative valence on recognition performance after a long-delay interval in the present study underlines the importance of emotional valence in memory consolidation of music. This final result seems to be in agreement with Eschrich et al. (2008) who showed a better recognition, after 48 hours, of very positive music compared to less positive music. Thus, our study, by responding to the limitations of Alonso et al. (i.e., the difference in number of presentations, the heterogeneous population, the small sample size) brings new evidence on the impact of the emotional dimensions and in particular the positive valence on the consolidation of musical memory.

The better consolidation of positive versus negative stimuli reported here suggests that emotion does not have a uniform effect on memory. Moreover, it is noteworthy that previously reported studies also demonstrated a positive valence advantage on musical memory after long time periods (after a 24-hour delay for Samson et al., 2009 and after several days or weeks for Eschrich et al., 2005, 2008). In these cases as well, memory was assessed at only one delay interval. Furthermore, this result confirms that memory enhancement is particularly pronounced over time (Yonelinas and Ritchey, 2015). While the memory traces of neutral information are gradually affected by a phenomenon of forgetfulness (Ebbinghaus, 1885), emotional stimuli are more resistant and even better recognized after a long period of time thanks to the consolidation process. Emotions generated by the musical material make musical memory more resistant to forgetting, a finding consistent with the literature on the emotional enhancement effect of memory (Jäncke, 2008). The novel aspect of this current study, however, is the finding that musical memory consolidation is strongly related to the characteristics of the positive valence, which is not the case in studies in the non-musical field. Using pictures and words, several studies demonstrated a negative valence effect on memory (for a review see Kensinger, 2007). Indeed, according to evolutionary theories, the main function of emotion

would be to guide our behavior: fear, for example, allows us to avoid danger and prepares us to act (Darwin, 1872). It is therefore logical that our attention should focus more on the threatening elements, thus allowing us to better memorize negative information (Kensinger, 2007). Given that music is a predominantly hedonic activity, this negativity bias would not be found for musical stimuli.

Another particularity of the current study is to have used exclusively non-familiar musical excerpts to avoid any confounding factors related to familiarity. Indeed, when musical excerpts are known, such as the piano pieces by Bach used in the study by Eschrich et al. (2005), the emotion associated with the excerpts would be more often linked to an autobiographical event (Janata et al., 2007). As a result, these excerpts could lead participants to remember memories and convey more intense emotions than when faced with unfamiliar music. This could also explain the effect of the arousal found in the study by Eschrich et al. (2005) that we were not able to demonstrate in the current study. Although we were not in control of the encoding strategies used by the listeners, we can assume that performing an elaborative rehearsal with non-familiar music is more complex, and probably impossible. Unlike pictures or words, which are generally associated with preexisting knowledge, new pieces of music are difficult to relate to already existing information. In this case, difficulties in thinking about the meaning of an item to be remembered, or making connections between that item and prior knowledge, may have limited the use of elaborative rehearsal known to improve memory abilities. Therefore, when exposed to new music, listeners can only rely on their own emotional feeling, on the attractiveness or the pleasantness of the musical pieces or on their familiarity to the musical style rather than to a specific event. One recent study demonstrated musical memory to be strongly related to pleasantness (Ferrerri and Rodriguez-Fornells, 2017). The authors showed that musical excerpts rated as very pleasant were better recognized than musical excerpts rated as less pleasant. Listeners may indeed experience greater pleasure from listening to positive valence music than negative valence music. Based on all previously reported findings, we therefore propose that the time-dependent effect of emotion attributed to a process of emotional consolidation is mainly predicated on the positive or pleasurable experience of music. It remains to be clarified whether dispensing instructions to rate pleasantness will further improve memory consolidation for music. Moreover, a relationship between arousal and pleasure has already been discussed by Berlyne's hedonic model (1971). According to this model, very low or high arousal values would lead to low pleasure whereas medium arousal values would lead to high pleasure (1971). This suggests the existence of a

complex relationship between arousal and pleasure that needs to be further investigated in the musical domain. Another point to be clarified in the future would be the impact of musical characteristics that might have contributed to emotion and to musical memory. For instance, it has been reported that variations in intrinsic musical characteristics such as timbre or tempo modulate musical memory (Halpern and Müllensiefen (2008). Even if the musical excerpts used in our study were very homogeneous in terms of musical characteristics, such as rhythm, mode and tempo since targets and distractors were selected from a small set symphonies written by composers between 1830 and 1954, we can not exclude the impact of intrinsic musical features in recognition.

To conclude, the present study succeeded in demonstrating the impact of emotion on musical long-term memory, thus improving our understanding of the specific role played by emotional valence and arousal on memory consolidation. The positivity effect observed in young adults after a long study-test interval may be related to the effect of pleasantness in remembering musical excerpts recently reported in the literature (Ferreri and Rodriguez-Fornells, 2017), lending credence to arguments in favor of considering memory differently according to valence (i.e., positive vs negative). To our knowledge, our study is the first to demonstrate a clear improvement in remembering positive musical excerpts resulting from a consolidation process. Further study will be necessary to generalize this emotional enhancement of musical memory to other musical styles and different populations, from children to the elderly. If positive music has such a strong influence on our cognitive system and in particular on our memory abilities, it raises questions as to whether the memory-enhancing effect of emotional music could be used to enhance cognitive performance in general and clinical settings.

## References

- Alonso, I., Dellacherie, D., & Samson, S. (2015). Emotional memory for musical excerpts in young and older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2015.00023>
- Altenmüller, E. O., Siggel, S., Mohammadi, B., Samii, A., & Münte, T. F. (2014). Play it again sam: Brain correlates of emotional music recognition. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00114>
- Aubé, W., Peretz, I., & Armony, J. L. (2013). The effects of emotion on memory for music and vocalisations. *Memory*, 21(8), 981–990. <https://doi.org/10.1080/09658211.2013.770871>
- Berlyne, D. E. (1971). *Aesthetics and Psychobiology* New York: Appleton-Century-Crofts.
- Bradley, M. M., Greenwald, M. K., Petry, M. C., & Lang, P. J. (1992). Remembering pictures: Pleasure and arousal in memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18(2), 379.
- Cabeza, R., & Dolcos, F. (2002). Event-related potentials of emotional memory: Encoding pleasant, unpleasant, and neutral pictures. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 2(3), 252–263. <https://doi.org/10.3758/CABN.2.3.252>
- Comblain, C., D’Argembeau, A., Van der Linden, M., & Aldenhoff, L. (2004). The effect of ageing on the recollection of emotional and neutral pictures. *Memory*, 12(6), 673–684. <https://doi.org/10.1080/09658210344000477>
- Darwin C. (1872), *The expression of the emotions in man and animals*, (3rd ed.1998), Oxford University Press, New York.
- Dellacherie, D., Ehrlé, N., & Samson, S. (2008). Is the neutral condition relevant to study musical emotion in patients? *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 25(4), 285–294. <https://doi.org/10.1525/mp.2008.25.4.285>
- Denburg, N. L., Buchanan, T. W., Tranel, D., & Adolphs, R. (2003). Evidence for preserved emotional memory in normal older persons. *Emotion*, 3(3), 239–253. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.3.3.239>
- Dolcos, F., & Denkova, E. (2014). Current Emotion Research in Cognitive Neuroscience: Linking Enhancing and Impairing Effects of Emotion on Cognition. *Emotion Review*, 6(4), 362–375. <https://doi.org/10.1177/1754073914536449>

- Dolcos, F., LaBar, K. S., & Cabeza, R. (2004). Dissociable effects of arousal and valence on prefrontal activity indexing emotional evaluation and subsequent memory: An event-related fMRI study. *NeuroImage*, 23(1), 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.05.015>
- Ebbinghaus, H. (1885). *Über das gedächtnis: Untersuchungen zur experimentellen psychologie*. Duncker & Humblot.
- Ehrlé, N. (1998). Traitement temporel de l'information auditive et lobe temporal [Temporal processing of auditory information in mediotemporal lobe] (Unpublished thesis). *Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, France*.
- Ellis, B. W., Johns, M. W., Lancaster, R., Raptopoulos, P., Angelopoulos, N., & Priest, R. G. (1981). The St. Mary's Hospital Sleep Questionnaire: A Study of Reliability. *Sleep*, 4(1), 93–97. <https://doi.org/10.1093/sleep/4.1.93>
- Ely, T. D., Grafton, S. T., Kilts, C. D., & Hamann, S. (1999). Amygdala activity related to enhanced memory for pleasant and aversive stimuli. *Nature Neuroscience*, 2(3), 289–293. <https://doi.org/10.1038/6404>
- Eschrich, S., Münte, T. F., & Altenmüller, E. O. (2005). Remember Bach: An Investigation in Episodic Memory for Music. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060(1), 438–442. <https://doi.org/10.1196/annals.1360.045>
- Eschrich, S., Münte, T. F., & Altenmüller, E. O. (2008). Unforgettable film music: The role of emotion in episodic long-term memory for music. *BMC Neuroscience*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/1471-2202-9-48>
- Everaert, T., Spruyt, A., & De Houwer, J. (2011). On the (un) conditionality of automatic attitude activation: The valence proportion effect. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 65(2), 125.
- Ferreri, L., & Rodriguez-Fornells, A. (2017). Music-related reward responses predict episodic memory performance. *Experimental Brain Research*, 235(12), 3721–3731. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5095-0>
- Gosselin, N., Peretz, I., Noulhiane, M., Hasboun, D., Beckett, D., Baulac, M., & Samson, S. (2005). Impaired recognition of scary music following unilateral temporal lobe excision. *Brain*, 128(3), 628–640. <https://doi.org/10.1093/brain/awh420>
- Greenberg, Tokarev, & Estes. (2012). Affective Orientation Influences Memory for Emotional and Neutral Words. *The American Journal of Psychology*, 125(1), 71. <https://doi.org/10.5406/amerjpsyc.125.1.0071>

- Hamann, S. (2001). Cognitive and neural mechanisms of emotional memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(9), 394–400. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01707-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01707-1)
- Hu, P., Stylos-Allan, M., & Walker, M. P. (2006). Sleep Facilitates Consolidation of Emotional Declarative Memory. *Psychological Science*, 17(10), 891–898. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01799.x>
- Inaba, M., Nomura, M., & Ohira, H. (2005). Neural evidence of effects of emotional valence on word recognition. *International Journal of Psychophysiology*, 57(3), 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2005.01.002>
- Janata, P., Tomic, S. T., & Rakowski, S. K. (2007). Characterisation of music-evoked autobiographical memories. *Memory*, 15(8), 845–860. <https://doi.org/10.1080/09658210701734593>
- Jäncke, L. (2008). Music, memory and emotion. *Journal of Biology*, 7(6), 21. <https://doi.org/10.1186/jbiol82>
- Kensinger, E. A. (2007). Negative Emotion Enhances Memory Accuracy: Behavioral and Neuroimaging Evidence. *Current Directions in Psychological Science*, 16(4), 213–218. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2007.00506.x>
- Kensinger, E. A. (2008). Age Differences in Memory for Arousing and Nonarousing Emotional Words. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 63(1), P13–P18. <https://doi.org/10.1093/geronb/63.1.P13>
- Kensinger, E. A. (2009). Remembering the Details: Effects of Emotion. *Emotion Review*, 1(2), 99–113. <https://doi.org/10.1177/1754073908100432>
- Kensinger, E. A., & Corkin, S. (2004). Two routes to emotional memory: Distinct neural processes for valence and arousal. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(9), 3310–3315.
- Koelsch, S. (2014). Brain correlates of music-evoked emotions. *Nature Reviews Neuroscience*, 15(3), 170–180. <https://doi.org/10.1038/nrn3666>
- Li, X., Li, X., Chen, S., Zhu, J., Wang, H., Tian, Y., & Yu, Y. (2018). Effect of emotional enhancement of memory on recollection process in young adults: The influence factors and neural mechanisms. *Brain Imaging and Behavior*, 14, 119–129. <https://doi.org/10.1007/s11682-018-9975-0>
- Mickley, K. R., & Kensinger, E. A. (2008). Emotional valence influences the neural correlates associated with remembering and knowing. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 8(2), 143–152. <https://doi.org/10.3758/CABN.8.2.143>

- Narme, P., Peretz, I., Strub, M.-L., & Ergis, A.-M. (2016). Emotion effects on implicit and explicit musical memory in normal aging. *Psychology and Aging, 31*(8), 902–913. <https://doi.org/10.1037/pag0000116>
- Ochsner, K. N. (2000). Are affective events richly recollected or simply familiar? The experience and process of recognizing feelings past. *Journal of Experimental Psychology: General, 129*(2), 242–261. <https://doi.org/10.1037//0096-3445.129.2.242>
- Payne, J. D., Stickgold, R., Swanberg, K., & Kensinger, E. A. (2008). Sleep Preferentially Enhances Memory for Emotional Components of Scenes. *Psychological Science, 19*(8), 781–788. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2008.02157.x>
- Pierce, B. H., & Kensinger, E. A. (2011). Effects of emotion on associative recognition: Valence and retention interval matter. *Emotion, 11*(1), 139–144. <https://doi.org/10.1037/a0021287>
- Reed, A. E., Chan, L., & Mikels, J. A. (2014). Meta-analysis of the age-related positivity effect: Age differences in preferences for positive over negative information. *Psychology and Aging, 29*(1), 1–15. <https://doi.org/10.1037/a0035194>
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology, 39*(6), 1161.
- Samson, S., Dellacherie, D., & Platel, H. (2009). Emotional Power of Music in Patients with Memory Disorders: Clinical Implications of Cognitive Neuroscience. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1169*(1), 245–255. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04555.x>
- Shacham, S. (1983). A Shortened Version of the Profile of Mood States. *Journal of Personality Assessment, 47*(3), 305–306. [https://doi.org/10.1207/s15327752jpa4703\\_14](https://doi.org/10.1207/s15327752jpa4703_14)
- Sharot, T., & Phelps, E. A. (2004). How arousal modulates memory: Disentangling the effects of attention and retention. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience, 4*(3), 294–306. <https://doi.org/10.3758/CABN.4.3.294>
- Sharot, T., & Yonelinas, A. P. (2008). Differential time-dependent effects of emotion on recollective experience and memory for contextual information. *Cognition, 106*(1), 538–547. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.03.002>
- Vieillard, S., & Gilet, A.-L. (2013). Age-related differences in affective responses to and memory for emotions conveyed by music: A cross-sectional study. *Frontiers in Psychology, 4*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00711>

- Vieillard, S., Peretz, I., Gosselin, N., Khalfa, S., Gagnon, L., & Bouchard, B. (2008). Happy, sad, scary and peaceful musical excerpts for research on emotions. *Cognition & Emotion*, 22(4), 720–752. <https://doi.org/10.1080/02699930701503567>
- Wagner, U., Hallschmid, M., Rasch, B., & Born, J. (2006). Brief Sleep After Learning Keeps Emotional Memories Alive for Years. *Biological Psychiatry*, 60(7), 788–790. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2006.03.061>
- Waring, J. D., & Kensinger, E. A. (2009). Effects of emotional valence and arousal upon memory trade-offs with aging. *Psychology and Aging*, 24(2), 412–422. <https://doi.org/10.1037/a0015526>
- Yonelinas, A. P. (1994). Receiver-Operating Characteristics in Recognition Memory: Evidence for a Dual-Process Model. *Journal of Experimental Psychology*, 20(6), 1341–1354.
- Yonelinas, A. P., & Ritchey, M. (2015). The slow forgetting of emotional episodic memories: An emotional binding account. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(5), 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.02.009>



## ARTICLE II: French adaptation of a film music stimulus set: Normative emotional ratings of valence and arousal prompted by music excerpts<sup>2</sup>

**Clémence Nineuil<sup>1</sup>, Delphine Dellacherie<sup>1,2</sup> and Séverine Samson<sup>1,3</sup>**

3. Univ. Lille, ULR 4072 - PSITEC - Psychologie : Interactions Temps Émotions Cognition, F-59000, Lille, France
4. University Hospital of Lille, Department of Pediatric Neurology, 2 Av. Oscar Lambret, F-59037, Lille, France
5. AP-HP, GH Pitié-Salpêtrière-Charles Foix, Unité d'Epileptologie, F-75013, Paris, France

---

<sup>2</sup> Travaux ayant donné lieu à une publication :

**Nineuil, C.**, Dellacherie, D., & Samson, S. (2022). French adaptation of a film music stimulus set: Normative emotional ratings of valence and arousal prompted by music excerpts. *Psychology of Music*, 50(5), 1707-1715. <https://doi.org/10.1177/03057356211050683>

**Abstract:**

The aim of this study was to obtain French affective norms for the Film Music Stimulus Set (FMSS, Eerola and Vuoskoski, 2011). This data set consists of a relatively homogeneous series of musical stimuli made up of film music excerpts, known to trigger strong emotion. The 97 musical excerpts were judged by 194 native French participants using a simplified normative procedure in order to assess valence and arousal judgments. This normalization will: (1) provide researchers with standardized rated affective music to be used with a French population; (2) enable the investigation of individual listeners' differing emotional judgments; and (3) explore how cultural differences affect the ratings of musical stimuli. Our results, in line with those obtained in Finland and Spain, demonstrated the FMSS to be robust and interculturally valid within Western Europe. Age, sex, education and musical training were not found to have any effects on emotional judgments. In conclusion, this study provides the scientific community with a standardized-stimulus set of musical excerpts whose emotional valence and arousal have been validated by a sampling of the French population.

**Keywords:** music, emotion, affective norms, valence, arousal

## 1. Introduction

Music is capable of inducing strong emotional reactions in listeners. By inducing intense and varied emotions (e.g., sadness, fear, joy), music is a valuable tool for the study of emotion and its neurobiological foundations (for a review, Koelsch, 2010, 2014). However, very few standardized norms exist for emotional musical stimuli. The goal of the present study is to identify affective norms for a series of musical excerpts.

In the field of emotions, affective norms exist for different sets of stimuli including emotional pictures (Kurdi et al., 2017; Lang et al., 1999), sounds (Bradley and Lang, 1999b; Yang et al., 2018), words (Bradley and Lang, 1999a; Monnier and Syssau, 2014), faces (Ekman and Friesen, 1976; Goeleven et al., 2008), voices (Belin et al., 2008), and faces and voices (Ferdenzi et al., 2015). These stimulus sets offer a large range of emotional stimuli (approximately 100 to 1000 stimuli per data set), validated in a variety of contexts and across many countries on very large samples of participants.

Very few studies have, however, proposed a standardized set of affective stimuli in the musical domain. Given the lack of consensus on the type of musical stimuli best suited to induce emotions, different musical genres have been used, including pop music (Song et al., 2016), classical music (Lepping et al., 2016), film music (Eerola and Vuoskoski, 2011; Vieillard et al., 2008) or a mix of genres (Imbir and Gołąb, 2017) involving either instrumental music (i.e., Eerola and Vuoskoski, 2011) and/or vocal music with lyrics (i.e., Song et al., 2016). Depending on the studies, these musical stimuli have been selected from the musical repertory (Eerola and Vuoskoski, 2011; Imbir and Gołąb, 2017; Lepping et al., 2016; Song et al., 2016) or composed specifically for the study (Vieillard et al., 2008). As a result, the level of familiarity with the stimuli, which was not systematically controlled for, might differ between listeners. As underlined by Janata et al. (2007), the emotion associated with listening to familiar music is more closely related to the emotional response to personal memory than to acoustic experience. The use of unfamiliar musical excerpts could therefore limit this bias. Another variable to control for is the duration of the musical excerpts, which also varies a lot between the cited studies (from 9 to 60 seconds) and sometimes within the same data set. It is therefore necessary to use musical excerpts that are relatively homogeneous and well-controlled for in terms of musical genre, instrumental composition, familiarity, and duration.

In studies of affective norms, type of emotional judgment is an important parameter. Based on a categorical approach suggesting that emotions are represented in a series of discrete categories (see Ekman, 1992), some studies assessed categorical judgments using verbal labelling (e.g., happiness, sadness) (Eerola and Vuoskoski, 2011; Fuentes-Sánchez et al., 2020; Song et al., 2016; Vieillard et al., 2008). The recognition of the intended emotion portrayed by the musical excerpts enabled the identification of the best emotional label derivation. The other type of emotional judgment used across all musical studies is based on the circumplex model of affect (Russell, 1980). According to this model, emotions are represented in a two-dimensional affective space. One dimension concerns emotional valence, plotted along a continuum from negative (unpleasant) to positive (pleasant). The other dimension is arousal, depicted along a continuum from low level of excitement (relaxing) to a high level of excitement (stimulating). However, some authors have proposed to represent emotion in three dimensions, rather than two: valence, tension-arousal and energy-arousal (Schimmack and Grob, 2000). Eerola and Vuoskoski (2011) collected judgments according to these three dimensions. Based on the correlation observed between the ratings of tension-arousal and energy-arousal, the authors concluded that they could be grouped into a single “arousal” dimension. This finding was recently confirmed by Fuentes-Sánchez et al. (2020), emphasizing the relevance to using only two dimensions. By assessing the validity of the dimensional model against the commonly employed categorial approach, Eerola and Vuoskoski (2011) found high levels of agreement between the two models. However, the dimensional model seems to provide better inter-judge agreement when musical emotions are ambiguous. Unlike dimensional judgments, categorical judgments require the use of a verbal label calling upon other non-emotional cognitive resources. Dimensional judgments, however, account better for the complexity and richness of emotional feeling induced by music (Zentner et al., 2008) and minimize the use of verbal strategies. As previously described, the validation of the commonly used two-dimensional valence-arousal model emphasizes the relevance of this parsimonious model for characterizing musical emotion.

The previously mentioned normative studies of emotional excerpts were hampered by a strong limitation owing to their small (from 36 to 80) number of stimuli, restraining their use in behavioural studies. To our knowledge, only three studies proposed emotional norms for more than 100 musical excerpts (Eerola and Vuoskoski, 2011; Fuentes-Sánchez et al., 2020; Imbir and Gołąb, 2017). Moreover, the sample size was also small (fewer than 55 participants) in most studies making generalizing the findings difficult. The FMSS is the only study

validated in more than 100 participants, in Finland (Eerola and Vuoskoski, 2011) and more recently in Spain (Fuentes-Sánchez et al., 2020).

Finally, the effect of individual differences between listeners was rarely controlled for. Fuentes-Sánchez et al. (2020) examined the influence of sex on emotional responses. They found that women rated the musical excerpts as scarier, angrier and more exciting than men, suggesting that sex has an effect on affective judgments, a finding not reported in other studies (Imbir and Gołąb, 2017; Song et al., 2016). Age and musical training did not seem to affect ratings (Song et al., 2016), but samples sizes and range of participants' ages and degrees of musical training may have been too small to bring out a significant correlation. Controlling for the influence of the interindividual differences on emotional judgments in further studies therefore appears to be worthwhile.

This study aims at collecting French affective norms of a series of musical excerpts taken from the FMSS (Eerola and Vuoskoski, 2011) using emotional judgments of valence and arousal. This data set consists of film music excerpts, known to trigger strong emotion as underlined by Cohen (2011). They were selected by expert musicologists and then judged emotionally by Finnish students. For this purpose, participants were asked to judge valence (negative/positive) and arousal (peaceful/dynamic) induced by the musical excerpts on a four-point rating scale to identify musical excerpts that fit within each emotional combination that resulted from crossing the two emotional dimensions. The final goal of this study was to compare the emotional ratings of valence and arousal obtained in different European countries (Finland, Spain, France) to test the robustness of the original findings.

## 2. Methods

### 2.1. Participants

One hundred and ninety-seven French-speaking adults took part in this online study of their own volition via web-based social media. The musical hedonism of each participant was controlled using the four most representative items of the "emotion evocation" facet from the Barcelona Music Reward Questionnaire (BMRQ, Mas-Herrero et al., 2013). Three participants presenting musical anhedonia were excluded. Thus, the study was carried out using 194 participants, including 144 females and 50 men aged from 18 to 64 years (mean age =  $29.87 \pm 11.26$ ), with 9 to 17 years of education (mean number of years =  $14.63 \pm 1.67$ ) and with

different levels of music training (143 non-musicians, 51 musicians including 43 amateurs, 6 semi-professionals and 2 professional musicians).

## 2.2. Material

The material consisted of 97 instrumental film music excerpts without lyrics or sound effects taken from Eerola and Vuoskoski (2011), listed in **Table 1** (see in Appendix). Out the 110 excerpts composing the FMSS, 7 duplicate excerpts, one single-instrumental excerpts and 5 very familiar excerpts for French listeners, as attested by in a pilot study, were removed. The duration of the musical excerpts ranged from 11 to 27 seconds.

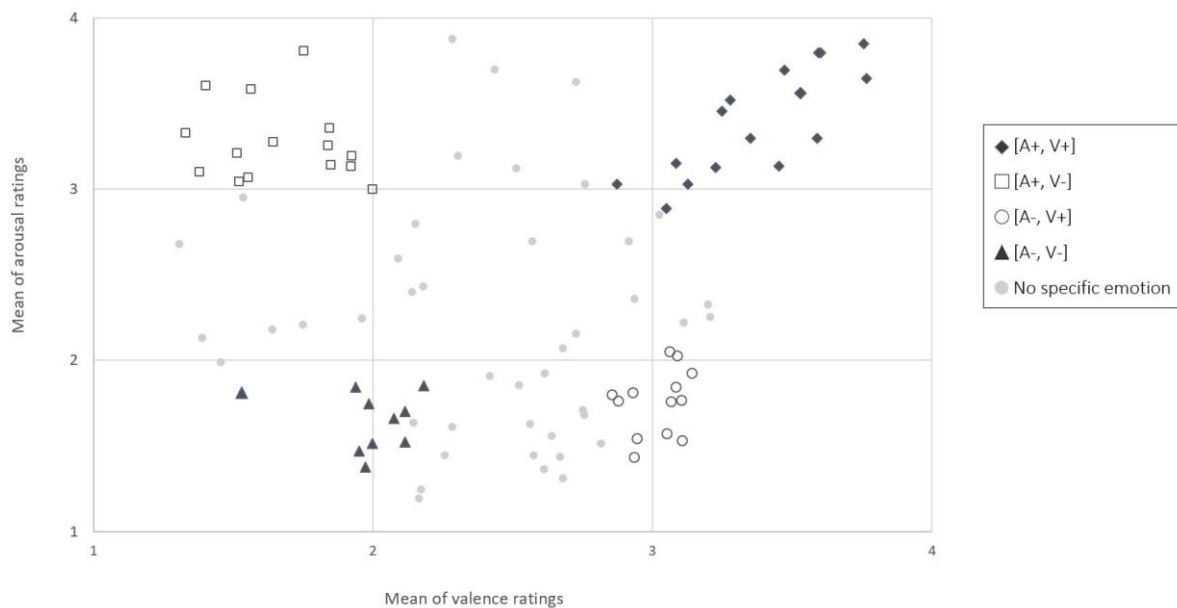
## 2.3. Procedure

Participants completed the online study on their personal computer. Before starting, each participant read an informational letter explaining the conditions of the study and gave their consent to participate. They were asked to move to a quiet place with adequate audio system or headphones. Then, participants completed a form requesting information (sex, age, education and music training) and filled 4 items taken from the BMRQ (e.g., "I like to listen to music that contains emotions") by providing their degree of agreement (ranging from "completely disagree" to "completely agree").

To limit the duration of the test and to prevent the participants from giving up in the middle of the experiment, each participant listened to a sub-group of 48 excerpts randomly selected. Participants were instructed to assess their subjective emotional experience by self-reporting the emotion evoked by listening to the music. It was specified that their judgments should be spontaneous and independent of their musical preference in terms of style or instrumental composition. After listening each musical excerpt, two questions appeared on-screen simultaneously alongside two 4-point rating scales: "Is the emotion evoked by the music negative or positive?" with a scale ranging from "very negative" to "very positive" and "Is the emotion evoked by the music not energetic (peaceful) or very energetic (dynamic)?", accompanied by a scale ranging from "not energetic" to "very energetic". The participants had 10 seconds to give their judgments and each musical excerpt was presented only once. The duration of the task was about twenty minutes.

### 3. Results

Since the participants judged a random selection of 48 musical stimuli, we obtained between 68 and 84 judgments (mean number of ratings  $77.3 \pm 2.6$ ) for each excerpt (as reported **Table 1** in Supplementary Materials). An inter-judge agreement criterion equal or superior to 75% was retained to determine the valence and arousal of each musical excerpt (i.e., a musical excerpt judged to be “very negative” or “negative” by more than 75% of the participants was considered as having a negative valence). Using this method, 35 excerpts with positive valence [V+], 35 excerpts with negative valence [V-] and 27 excerpts with ambiguous valence were identified. With regard to arousal, 37 high-arousal excerpts [A+], 40 low-arousal excerpts [A-] and 20 excerpts with ambiguous arousal were identified. As illustrated in **Figure 4**, 54 excerpts caused participants to feel one of the four different emotional combinations, including 16 [A+, V+], 15 [A+, V-], 13 [A-, V+] and 10 [A-, V-] excerpts, whereas 44 excerpts elicited no specific emotion. These results are summarized in **Table 1** (see in Supplementary Materials). Moreover, Pearson correlation analysis showed that arousal and valence ratings did not correlate ( $r = -0.006$ ;  $p = 0.937$ ).



**Figure 4.** Representation of the 97 Musical Excerpts According to the Judgments of Valence and Arousal by French Participants. The Different Symbols Correspond to Musical Excerpts Fitting to One of the Four Emotional Combinations Based on a Least 75% Inter-Rater Agreement or Not Fitting to Any Emotional Combination.

Notes. V+: positive valence; V-: negative valence; A+: high arousal; A-: low arousal.

### 3.1. Effect of individual listeners differences on emotional judgments

Pearson correlation analyses showed that ratings for valence did not correlate with the participants' age ( $r = 0.139$ ;  $p = 0.053$ ) or level of education ( $r = -0.135$ ;  $p = 0.061$ ). Ratings for arousal were similarly uncorrelated with participants' age ( $r = -0.005$ ;  $p = 0.946$ ) and level of education ( $r = -0.091$ ;  $p = 0.208$ ). Moreover, Student's *t*-test revealed that sex and music training had no effect on valence or arousal ratings (all  $ps > 0.05$ ).

### 3.2. Effect of cultural differences on emotional judgments

The ratings obtained for the 97 musical excerpts used in both French and Finnish studies, as well as the ratings of the 96 musical excerpts used in both French and Spanish studies, were analysed. Pearson correlation analyses showed a positive correlation between the mean of the valence ratings obtained in France and in the other countries (Finland,  $r = 0.956$ ;  $p < 0.001$ ; Spain,  $r = 0.928$ ;  $p < 0.001$ ). We also found mean arousal judgments in France to be positively correlated with energy-arousal judgments (Finland,  $r = 0.956$ ;  $p < 0.001$ ; Spain,  $r = 0.939$ ;  $p < 0.001$ ) and tension-arousal judgments (Finland,  $r = 0.566$ ;  $p < 0.001$ ; Spain,  $r = 0.752$ ;  $p < 0.001$ ).

## 4. Discussion

The aim of this study was to obtain French affective norms of the FMSS (Eerola and Vuoskoski, 2011). For this purpose, we used a normative rating procedure based on two dimensions, valence and arousal. The present study also aimed to assess the influence of individual differences (e.g., age, sex, education level, musical training) and cultural differences on the emotional ratings of musical stimuli. To avoid any bias due to familiarity with the musical excerpts and the presence of lyrics, we selected only unfamiliar instrumental music from the original data base. The main finding of this study suggests that the FMSS proposes a set of musical excerpts with clearly defined emotional valence and arousal. The absence of correlation between these two emotional dimensions confirms that rating of valence can be dissociated from rating of arousal. Furthermore, the results obtained show that listeners' individual differences and cultural origins do not affect emotional judgments, confirming the relevance of such normative musical studies and the cross-cultural validity of this specific affective stimulus set, at least in Western European countries.

In the current study, we first established average emotional valence and arousal ratings for each musical excerpt. Based on inter-judge agreements of individual ratings, we succeeded

at identifying a set of musical excerpts which consistently elicited either positive or negative valence. We also identified a set of stimuli triggering either high or low levels of arousal in most participants. All the remaining excerpts were considered emotionally ambiguous, as they were unclear in terms of valence and arousal. In line with previously reported ratings with this stimulus set (Eerola and Vuoskoski, 2011; Fuentes-Sánchez et al., 2020), we found that the FMSS provides a large range of emotional stimuli inducing different types of valence and arousal. Such normative data should enable researchers to select the most appropriate stimulus sets for investigating the influence of both emotional valence and arousal on various cognitive mechanisms such as attention or memory (see Nineuil et al., 2020). These data could also make it possible to explore the psychological mechanisms and cerebral bases of emotional ambiguity, which have seldom been examined in the musical domain (Dellacherie et al., 2008; for review, Schoth and Liossi, 2017) compared to other domains (for faces, see Cooney et al., 2006).

Another important finding of the present study concerns the absence of correlation between valence and arousal ratings. It confirms that valence and arousal are separable emotional features (Russell, 1980). Although some studies in the musical domain and non-musical domain also reported no correlation between these emotional dimensions (Kurdi et al., 2017; Vieillard et al., 2008), some divergent results have been reported (Eerola and Vuoskoski, 2011; Fuentes-Sánchez et al., 2020; Imbir and Gołąb, 2017; Yang et al., 2018). Another stimulus set involving a mix of musical genres including instrumental and vocal music, Imbir and Gołąb (2017) found a positive correlation between arousal and valence. Thus, positive-valence musical excerpts were considered arousing, whereas negative-valence excerpts elicited low arousal. However, whether the divergent results can be explained by differences between the stimulus sets and/or the participants remains difficult to determine. The other studies using the FMSS also reported correlations between emotional ratings (Eerola and Vuoskoski, 2011, Fuentes-Sánchez et al., 2020). By using three emotional dimensions, these authors found a negative correlation between valence and tension-arousal. The excerpts rated as positive were evaluated as less tense, suggesting that emotional valence and tension-arousal in music are not independent emotional features. Conversely, the absence of correlation between valence and energy-arousal ratings suggests that these emotional dimensions depend on distinct features.

The results of our study did not reveal age, sex, level of education or musical training to have any effect on emotional judgments, suggesting that individual differences among listeners do not influence ratings. These findings are in line with most previously published

data using music (Imbir and Gołąb, 2017; Song et al., 2016), although all these factors have never been controlled for together in previous studies. Fuentes-Sánchez et al. (2020) reported an effect of sex on arousal ratings, a finding already obtained with emotional pictures (Bradley et al., 2001; Kurdi et al., 2017), but no effect of sex on valence ratings has been documented in music, although such an effect has been found with emotional sounds (Yang et al., 2018).

The strong agreement between the emotional ratings of the French participants, and that obtained in Finland (Eerola and Vuoskoski, 2011) and Spain (Fuentes-Sánchez et al., 2020) is striking and underlines the robustness validity of our data. First, we found a positive correlation between our respective valence ratings. Second, we observed correlations between our study's arousal ratings and the energy-arousal ratings and tension-arousal ratings obtained in the previous studies. These findings confirm the hypothesis that the arousal dimension, developed by Russell (1980), allows scholars to replace energy-arousal and tension-arousal by a single dimension (Eerola and Vuoskoski, 2011; Fuentes-Sánchez et al., 2020). The current study offers evidence that consensus in emotional valence and arousal judgments is possible within the musical domain. The replication of the previous findings emphasizes the cross-cultural validity within Western Europe and indicates that self-reported subjective emotional responses obtained online with a simpler rating scale (i.e., 4-point rather than 9-point rating scales) appear to be valid. Based on these results, we can be confident that testing environments do not affect emotional judgments. This result is all the more interesting in view of the situation brought on by COVID-19, which has increasingly prompted researchers to perform tasks remotely (Papatzikis et al., 2020). Additionally, using two dimensions rather than three and simplifying the response scales would limit comprehension problems, especially in clinical populations with comprehension disorders, and would make the tasks easier to administer.

The present study nevertheless contains a few methodological limits. Even though the sample of participants was large compared to other musical validation studies, larger and more diverse samples of men and women are necessary to generalize the reported findings. Due to the dynamic nature of music, it would be relevant to add a dimension of dominance to assess the extent to which the emotion evoked by a stimulus is controllable (Fontaine et al., 2007), as has already been done in visual studies. Likewise, to avoid confounds related to verbal labeling in the rating procedure, it would be preferable in future studies to use a graphic-rating scale such as Self-Assessment Manikin (SAM; Bradley and Lang, 1994). Finally, the duration of the musical stimuli used in the present study varied from 11 to 27 seconds. Although it should not

affect emotional judgments, according to Bigand et al. (2005), standardization of stimuli with the same duration could be useful for many behavioral or psychophysiological studies. Moreover, each participant did not judge all the musical excerpts and the number of judgments per excerpt was not exactly the same. Despite all the methodological discrepancies between these studies, the judgments obtained in the current study correlate with those previously reported by Eerola and Vuoskoski (2011) and Fuentes-Sánchez et al. (2020) emphasizing the robustness of the data.

In conclusion, these results suggest that reliable emotional judgments can be performed online. Moreover, this study provides the scientific community with a French standardized stimulus set of musical excerpts validated with respect to emotional valence and arousal judgements. This internationally accessible set of emotionally evocative stimuli complements those previously validated. It can be used for future research on music, emotion, and cognition (e.g., emotional judgment task, musical memory task, musical interventions, electrophysiological study), and to improve our understanding of musical emotions in healthy population or patients.

## References

- Belin, P., Fillion-Bilodeau, S., and Gosselin, F. (2008). The Montreal Affective Voices: A validated set of nonverbal affect bursts for research on auditory affective processing. *Behavior Research Methods*, 40(2), 531–539. <https://doi.org/10.3758/BRM.40.2.531>
- Bigand, E., Vieillard, S., Madurell, F., Marozeau, J., and Dacquet, A. (2005). Multidimensional scaling of emotional responses to music: The effect of musical expertise and of the duration of the excerpts. *Cognition & Emotion*, 19(8), 1113–1139. <https://doi.org/10.1080/02699930500204250>
- Bradley, M. M., Codispoti, M., Sabatinelli, D., and Lang, P. J. (2001). Emotion and motivation II: Sex differences in picture processing. *Emotion*, 1(3), 300–319. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.1.3.300>
- Bradley, M. M., and Lang, P. J. (1999a). *Affective Norms for English Words (ANEW): Instruction Manual and Affective Ratings*. 49.
- Bradley, M. M., and Lang, P. J. (1999b). International affective digitized sounds (IADS): Stimuli, instruction manual and affective ratings (Tech. Rep. No. B-2). *Gainesville, FL: The Center for Research in Psychophysiology, University of Florida*.
- Cohen, A. J. (2011). Music as a source of emotion in film. In P. N. Juslin and J. Sloboda (Eds.), *Handbook of Music and Emotion: Theory, Research, Applications*. Oxford University Press.
- Cooney, R. E., Atlas, L. Y., Joormann, J., Eugène, F., and Gotlib, I. H. (2006). Amygdala activation in the processing of neutral faces in social anxiety disorder: Is neutral really neutral? *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 148(1), 55–59. <https://doi.org/10.1016/j.psychresns.2006.05.003>
- Dellacherie, D., Ehrlé, N., and Samson, S. (2008). Is the neutral condition relevant to study musical emotion in patients? *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 25(4), 285–294. <https://doi.org/10.1525/mp.2008.25.4.285>
- Eerola, T., and Vuoskoski, J. K. (2011). A comparison of the discrete and dimensional models of emotion in music. *Psychology of Music*, 39(1), 18–49. <https://doi.org/10.1177/0305735610362821>
- Ekman, P. (1992). An argument for basic emotions. *Cognition and Emotion*, 6(3–4), 169–200.
- Ekman, P., and Friesen, W. V. (1976). Measuring facial movement. *Environmental Psychology and Nonverbal Behavior*, 1(1), 56–75.

- Ferdenzi, C., Delplanque, S., Mehu-Blantar, I., Cabral, K. M. D. P., Felicio, M. D., and Sander, D. (2015). The Geneva faces and voices (GEFAV) database. *Behavior Research Methods*, 47(4), 1110–1121.
- Fontaine, J. R. J., Scherer, K. R., Roesch, E. B., and Ellsworth, P. C. (2007). The World of Emotions is not Two-Dimensional. *Psychological Science*, 18(12), 1050–1057. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.02024.x>
- Fuentes-Sánchez, N., Pastor, R., Eerola, T., and Pastor, M. C. (2020). Spanish adaptation of a film music stimulus set (FMSS): Cultural and gender differences in the perception of emotions prompted by music excerpts. *Psychology of Music*, 030573562095846. <https://doi.org/10.1177/0305735620958464>
- Goeleven, E., De Raedt, R., Leyman, L., and Verschuere, B. (2008). The Karolinska Directed Emotional Faces: A validation study. *Cognition and Emotion*, 22(6), 1094–1118. <https://doi.org/10.1080/02699930701626582>
- Imbir, K., and Gołąb, M. (2017). Affective reactions to music: Norms for 120 excerpts of modern and classical music. *Psychology of Music*, 45(3), 432–449. <https://doi.org/10.1177/0305735616671587>
- Janata, P., Tomic, S. T., and Rakowski, S. K. (2007). Characterisation of music-evoked autobiographical memories. *Memory*, 15(8), 845–860. <https://doi.org/10.1080/09658210701734593>
- Koelsch, S. (2010). Towards a neural basis of music-evoked emotions. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(3), 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.01.002>
- Koelsch, S. (2014). Brain correlates of music-evoked emotions. *Nature Reviews Neuroscience*, 15(3), 170–180. <https://doi.org/10.1038/nrn3666>
- Kurdi, B., Lozano, S., and Banaji, M. R. (2017). Introducing the Open Affective Standardized Image Set (OASIS). *Behavior Research Methods*, 49(2), 457–470. <https://doi.org/10.3758/s13428-016-0715-3>
- Lang, P. J., Bradley, M. M., and Cuthbert, B. N. (1999). International affective picture system (IAPS): Instruction manual and affective ratings. *The Center for Research in Psychophysiology, University of Florida*.
- Lepping, R. J., Atchley, R. A., and Savage, C. R. (2016). Development of a validated emotionally provocative musical stimulus set for research. *Psychology of Music*, 44(5), 1012–1028. <https://doi.org/10.1177/0305735615604509>

- Mas-Herrero, E., Marco-Pallares, J., Lorenzo-Seva, U., Zatorre, R. J., and Rodriguez-Fornells, A. (2013). Individual Differences in Music Reward Experiences. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 31(2), 118–138. <https://doi.org/10.1525/mp.2013.31.2.118>
- Monnier, C., and Syssau, A. (2014). Affective norms for french words (FAN). *Behavior Research Methods*, 46(4), 1128–1137. <https://doi.org/10.3758/s13428-013-0431-1>
- Nineuil, C., Dellacherie, D., and Samson, S. (2020). The Impact of Emotion on Musical Long-Term Memory. *Frontiers in Psychology*, 11, 2110. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.02110>
- Papatzikis, E., Zeba, F., Särkämö, T., Ramirez, R., Grau-Sánchez, J., Tervaniemi, M., and Loewy, J. (2020). Mitigating the Impact of the Novel Coronavirus Pandemic on Neuroscience and Music Research Protocols in Clinical Populations. *Frontiers in Psychology*, 11, 2160. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.02160>
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39(6), 1161.
- Schimmack, U., and Grob, A. (2000). *Dimensional Models of Core Affect: A Quantitative Comparison by Means of Structural Equation Modeling*. 21.
- Schoth, D. E., and Lioffi, C. (2017). A Systematic Review of Experimental Paradigms for Exploring Biased Interpretation of Ambiguous Information with Emotional and Neutral Associations. *Frontiers in Psychology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00171>
- Song, Y., Dixon, S., Pearce, M. T., and Halpern, A. R. (2016). Perceived and Induced Emotion Responses to Popular Music. *Music Perception*, 33(4), 472–492. <https://doi.org/10.1525/mp.2016.33.4.472>
- Vieillard, S., Peretz, I., Gosselin, N., Khalfa, S., Gagnon, L., and Bouchard, B. (2008). Happy, sad, scary and peaceful musical excerpts for research on emotions. *Cognition & Emotion*, 22(4), 720–752. <https://doi.org/10.1080/02699930701503567>
- Yang, W., Makita, K., Nakao, T., Kanayama, N., Machizawa, M. G., Sasaoka, T., Sugata, A., Kobayashi, R., Hiramoto, R., Yamawaki, S., Iwanaga, M., and Miyatani, M. (2018). Affective auditory stimulus database: An expanded version of the International Affective Digitized Sounds (IADS-E). *Behavior Research Methods*, 50(4), 1415–1429. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-1027-6>
- Zentner, M., Grandjean, D., and Scherer, K. R. (2008). Emotions evoked by the sound of music: Characterization, classification, and measurement. *Emotion*, 8(4), 494–521. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.8.4.494>

## Supplementary Materials

**Table 1.**

Mean (M) and standard deviation (SD) of emotional ratings and emotional combinations for the French sample (n = 194)

| Nro of Eerola<br>and Vuoskoski<br>(2011) set2 | Album Name           | Number of<br>judgments | Arousal ratings <sup>1</sup> |       | Arousal judgement <sup>3</sup> | Valence ratings <sup>2</sup> |        | Valence judgment <sup>3</sup> | Emotional<br>combination <sup>3,4</sup> |
|-----------------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------|-------|--------------------------------|------------------------------|--------|-------------------------------|-----------------------------------------|
|                                               |                      |                        | M                            | SD    |                                | M                            | SD     |                               |                                         |
| 1                                             | Lethal weapon 3      | 77                     | 3.605                        | 0.694 | high                           | 1.403                        | 0.568  | negative                      | A+V-                                    |
| 2                                             | The Rainmaker        | 80                     | 3.582                        | 0.709 | high                           | 1.563                        | 0.672  | negative                      | A+V-                                    |
| 3                                             | The Alien Trilogy    | 73                     | 3.808                        | 0.544 | high                           | 1.753                        | 0.813  | negative                      | A+V-                                    |
| 4                                             | Cape Fear            | 76                     | 3.211                        | 0.639 | high                           | 1.513                        | 0.599  | negative                      | A+V-                                    |
| 5                                             | The Fifth Element    | 77                     | 3.355                        | 0.647 | high                           | 1.844                        | 0.812  | negative                      | A+V-                                    |
| 6                                             | Crouching Tiger jne. | 81                     | 3.625                        | 0.560 | high                           | 2.728                        | 0.652  | X                             |                                         |
| 8                                             | Man of Galilee CD1   | 78                     | 3.195                        | 0.629 | high                           | 1.923                        | 0.769  | negative                      | A+V-                                    |
| 9                                             | The Untouchables     | 79                     | 3.696                        | 0.540 | high                           | 2.436                        | 0.748  | X                             |                                         |
| 10                                            | Oliver Twist         | 78                     | 2.788                        | 0.795 | X                              | 1.454                        | 0.653  | negative                      |                                         |
| 11                                            | Batman Returns       | 78                     | 2.679                        | 0.932 | X                              | 1.308                        | 0.464  | negative                      |                                         |
| 12                                            | JFK                  | 75                     | 3.253                        | 0.718 | high                           | 1.840                        | 0.678  | negative                      | A+V-                                    |
| 13                                            | JFK                  | 76                     | 3.000                        | 0.565 | high                           | 2.000                        | 0.588  | negative                      | A+V-                                    |
| 14                                            | The Alien Trilogy    | 73                     | 3.041                        | 0.806 | high                           | 1.521                        | 0.626  | negative                      | A+V-                                    |
| 15                                            | Hannibal             | 81                     | 1.988                        | 0.887 | X                              | 1.457                        | 0.592  | negative                      |                                         |
| 16                                            | Running Scared       | 74                     | 3.122                        | 0.661 | high                           | 2.514                        | 0.797  | X                             |                                         |
| 18                                            | The Fifth Element    | 76                     | 3.132                        | 0.596 | high                           | 1.921                        | 0.5600 | negative                      | A+V-                                    |
| 19                                            | Lethal weapon 3      | 78                     | 2.397                        | 0.744 | X                              | 2.141                        | 0.597  | X                             |                                         |
| 20                                            | Man of Galilee CD1   | 81                     | 3.877                        | 0.331 | high                           | 2.284                        | 0.825  | X                             |                                         |
| 21                                            | The Rainmaker        | 78                     | 3.295                        | 0.722 | high                           | 3.590                        | 0.545  | positive                      | A+V+                                    |
| 22                                            | Batman               | 78                     | 3.792                        | 0.439 | high                           | 3.603                        | 0.566  | positive                      | A+V+                                    |

|    |                       |    |       |       |      |       |       |          |      |
|----|-----------------------|----|-------|-------|------|-------|-------|----------|------|
| 23 | Shallow Grave         | 79 | 3.848 | 0.361 | high | 3.756 | 0.539 | positive | A+V+ |
| 24 | Man of Galilee CD1    | 79 | 3.795 | 0.406 | high | 3.595 | 0.588 | positive | A+V+ |
| 25 | Oliver Twist          | 75 | 3.123 | 0.686 | high | 3.227 | 0.648 | positive | A+V+ |
| 26 | The Omen              | 80 | 2.050 | 0.654 | low  | 3.063 | 0.559 | positive | A-V+ |
| 27 | Oliver Twist          | 75 | 3.133 | 0.622 | high | 3.453 | 0.576 | positive | A+V+ |
| 29 | The Portait of a Lady | 75 | 1.760 | 0.654 | low  | 2.880 | 0.492 | positive | A-V+ |
| 30 | Nostradamus           | 74 | 1.541 | 0.623 | low  | 2.946 | 0.570 | positive | A-V+ |
| 31 | The English Patient   | 78 | 1.697 | 0.653 | low  | 2.115 | 0.55T | negative | A-V- |
| 32 | Running Scared        | 76 | 1.743 | 0.683 | low  | 1.987 | 0.663 | negative | A-V- |
| 33 | The Portait of a Lady | 81 | 1.468 | 0.550 | low  | 1.951 | 0.739 | negative | A-V- |
| 34 | Big Fish              | 74 | 1.766 | 0.743 | low  | 2.419 | 0.860 | X        |      |
| 35 | Man of Galilee CD1    | 79 | 3.195 | 0.707 | high | 2.304 | 0.739 | X        |      |
| 36 | Angel Heart           | 75 | 1.243 | 0.491 | low  | 2.173 | 0.665 | X        |      |
| 38 | Dracula               | 79 | 1.190 | 0.394 | low  | 2.165 | 0.723 | X        |      |
| 39 | Shakespeare In Love   | 80 | 1.625 | 0.512 | low  | 2.563 | 0.743 | X        |      |
| 40 | The English Patient   | 80 | 1.442 | 0.638 | low  | 2.575 | 0.725 | X        |      |
| 41 | Shine                 | 74 | 1.757 | 0.658 | low  | 3.068 | 0.746 | positive | A-V+ |
| 42 | Pride & Prejudice     | 74 | 1.527 | 0.645 | low  | 3.108 | 0.631 | positive | A-V+ |
| 43 | Dances with Wolves    | 73 | 1.568 | 0.598 | low  | 3.054 | 0.520 | positive | A-V+ |
| 44 | Pride & Prejudice     | 79 | 1.430 | 0.547 | low  | 2.937 | 0.647 | positive | A-V+ |
| 45 | Oliver Twist          | 78 | 1.513 | 0.597 | low  | 2.818 | 0.663 | X        |      |
| 46 | Batman                | 80 | 1.363 | 0.509 | low  | 2.613 | 0.646 | X        |      |
| 47 | Oliver Twist          | 77 | 1.921 | 0.688 | low  | 3.143 | 0.600 | positive | A-V+ |
| 48 | Dracula               | 84 | 1.798 | 0.635 | low  | 2.857 | 0.540 | positive | A-V+ |
| 49 | Juha                  | 75 | 2.324 | 0.778 | X    | 3.200 | 0.615 | positive |      |
| 50 | Oliver Twist          | 78 | 1.558 | 0.573 | low  | 2.641 | 0.623 | X        |      |
| 51 | Juha                  | 77 | 2.250 | 0.750 | X    | 3.208 | 0.592 | positive |      |
| 54 | Pride & Prejudice     | 77 | 1.707 | 0.673 | low  | 2.753 | 0.610 | X        |      |
| 55 | Dances with Wolves    | 77 | 3.293 | 0.652 | high | 3.351 | 0.644 | positive | A+V+ |
| 56 | Man of Galilee CD1    | 80 | 3.025 | 0.693 | high | 2.875 | 0.603 | positive | A+V+ |

|    |                     |    |       |       |      |       |       |          |      |
|----|---------------------|----|-------|-------|------|-------|-------|----------|------|
| 57 | Shakespeare In Love | 76 | 3.453 | 0.599 | high | 3.250 | 0.635 | positive | A+V+ |
| 58 | Vertigo OST         | 78 | 1.923 | 0.598 | low  | 2.615 | 0.724 | X        |      |
| 59 | Vertigo OST         | 68 | 3.147 | 0.652 | high | 3.086 | 0.583 | positive | A+V+ |
| 60 | Outbreak            | 79 | 2.883 | 0.627 | high | 3.051 | 0.618 | positive | A+V+ |
| 61 | Juha                | 75 | 3.027 | 0.793 | high | 2.760 | 0.732 | X        |      |
| 62 | Shakespeare In Love | 80 | 2.205 | 0.709 | X    | 1.750 | 0.515 | negative |      |
| 63 | Batman              | 75 | 1.635 | 0.563 | low  | 2.147 | 0.651 | X        |      |
| 64 | The Fifth Element   | 82 | 1.840 | 0.749 | low  | 1.939 | 0.775 | negative | A-V- |
| 65 | Big Fish            | 77 | 2.592 | 0.733 | X    | 2.091 | 0.610 | negative |      |
| 66 | The English Patient | 82 | 2.951 | 0.784 | X    | 1.537 | 0.570 | negative |      |
| 68 | Road To Perdition   | 77 | 2.130 | 0.848 | X    | 1.390 | 0.610 | negative |      |
| 69 | Hellraiser          | 79 | 3.101 | 0.794 | high | 1.380 | 0.584 | negative | A+V- |
| 70 | Grizzle Man         | 79 | 1.810 | 0.906 | low  | 1.532 | 0.676 | negative | A-V- |
| 71 | The Untouchables    | 81 | 3.557 | 0.499 | high | 3.531 | 0.593 | positive | A+V+ |
| 73 | Shine               | 75 | 3.520 | 0.684 | high | 3.280 | 0.627 | positive | A+V+ |
| 74 | Shine               | 79 | 3.025 | 0.800 | high | 3.127 | 0.563 | positive | A+V+ |
| 76 | Juha                | 78 | 2.355 | 0.647 | X    | 2.936 | 0.610 | positive |      |
| 77 | Lethal weapon 3     | 80 | 2.848 | 0.556 | X    | 3.025 | 0.550 | positive |      |
| 78 | Crouching Tiger     | 77 | 2.693 | 0.787 | X    | 2.571 | 0.715 | X        |      |
| 79 | Batman              | 76 | 3.693 | 0.464 | high | 3.474 | 0.642 | positive | A+V+ |
| 80 | Oliver Twist        | 72 | 2.694 | 0.572 | X    | 2.915 | 0.470 | positive |      |
| 81 | Juha                | 82 | 1.854 | 0.630 | low  | 2.524 | 0.632 | X        |      |
| 83 | Big Fish            | 79 | 2.218 | 0.714 | X    | 3.114 | 0.530 | positive |      |
| 84 | Blanc               | 77 | 1.610 | 0.652 | low  | 2.286 | 0.581 | X        |      |
| 85 | Oliver Twist        | 74 | 1.851 | 0.655 | low  | 2.182 | 0.601 | negative | A-V- |
| 87 | Road To Perdition   | 78 | 1.658 | 0.555 | low  | 2.077 | 0.619 | negative | A-V- |
| 88 | Blanc               | 78 | 1.442 | 0.549 | low  | 2.256 | 0.633 | X        |      |
| 89 | Blanc               | 77 | 1.519 | 0.640 | low  | 2.117 | 0.584 | negative | A-V- |
| 90 | Batman Returns      | 77 | 1.513 | 0.642 | low  | 2.000 | 0.628 | negative | A-V- |
| 91 | The Alien Trilogy   | 80 | 3.141 | 0.639 | high | 1.850 | 0.638 | negative | A+V- |

|     |                     |    |       |       |      |       |       |          |      |
|-----|---------------------|----|-------|-------|------|-------|-------|----------|------|
| 92  | The Fifth Element   | 73 | 3.274 | 0.692 | high | 1.644 | 0.714 | negative | A+V- |
| 93  | Babylon 5           | 82 | 3.329 | 0.728 | high | 1.329 | 0.589 | negative | A+V- |
| 94  | Hellraiser          | 74 | 3.069 | 0.775 | high | 1.554 | 0.527 | negative | A+V- |
| 96  | The Missing         | 77 | 2.429 | 0.818 | X    | 2.179 | 0.678 | negative |      |
| 97  | Shallow Grave       | 78 | 2.795 | 0.811 | X    | 2.154 | 0.940 | X        |      |
| 98  | Naked Lunch         | 75 | 2.068 | 0.604 | low  | 2.680 | 0.596 | X        |      |
| 99  | Dracula             | 78 | 2.244 | 0.648 | X    | 1.962 | 0.590 | negative |      |
| 100 | Cape Fear           | 78 | 2.179 | 0.801 | X    | 1.641 | 0.644 | negative |      |
| 102 | Shakespeare In Love | 77 | 2.156 | 0.726 | X    | 2.727 | 0.503 | X        |      |
| 103 | The Fifth Element   | 74 | 1.811 | 0.695 | low  | 2.932 | 0.477 | positive | A-V+ |
| 104 | Crouching Tiger     | 78 | 1.679 | 0.654 | low  | 2.756 | 0.778 | X        |      |
| 105 | Pride & Prejudice   | 73 | 3.644 | 0.694 | high | 3.767 | 0.486 | positive | A+V+ |
| 106 | Lethal weapon 3     | 81 | 1.840 | 0.697 | low  | 3.086 | 0.574 | positive | A-V+ |
| 107 | The Godfarher       | 78 | 2.026 | 0.742 | low  | 3.090 | 0.585 | positive | A-V+ |
| 108 | Gladiator           | 79 | 1.436 | 0.594 | low  | 2.671 | 0.711 | X        |      |
| 109 | Pride & Prejudice   | 76 | 1.373 | 0.587 | low  | 1.974 | 0.816 | negative | A-V- |
| 110 | Big Fish            | 77 | 1.766 | 0.666 | low  | 3.105 | 0.601 | positive | A-V+ |

1. "Is the emotion evoked by the music not energetic (peaceful) or very energetic (dynamic)?". 4-point scale from 1 = "not energetic" to 4 = "very energetic".
2. "Is the emotion evoked by the music negative or positive?". 4-point scale from 1 = "very negative" to 4 = "very positive"
3. The criterion of inter-judge agreement equal or superior to 75%.
4. [A+] = high arousal, [A-] = low arousal, [V+] positive valence and [V-] negative valence



# ARTICLE III: Do emotional valence and arousal modulate long-term musical memory? A comparison of patients with medial temporal lobe lesions and healthy participants<sup>3</sup>

**Clémence Nineuil <sup>1</sup>, Delphine Dellacherie <sup>1,2</sup>, Marie Méré <sup>3</sup>, Marisa Denos <sup>4</sup>, Sogbie Dupont <sup>3,5</sup>, Bertrand Mathon <sup>3,6,7</sup> and Séverine Samson <sup>1,3,5</sup>**

1. Univ. Lille, ULR 4072 - PSITEC - Psychologie : Interactions Temps Émotions Cognition, F-59000 Lille, France
2. CHU Lille, Department of Pediatric Neurology, F-59000 Lille, France
3. Epilepsy Unit, AP-HP, Pitié-Salpêtrière Hospital, Paris, France
4. Rehabilitation Unit, AP-HP, Pitié-Salpêtrière Hospital, Paris, France
5. Centre de Recherche de l'Institut du Cerveau Et de La Moelle Épinière (ICM), UMPC-UMR 7225 CNRS-UMRS 975 Inserm, Paris, France
6. Department of Neurosurgery, La Pitié-Salpêtrière University Hospital, Paris, France
7. Paris Brain Institute, ICM, Inserm U 1127, CNRS UMR 7225, Sorbonne University, UMRS, 1127 Paris, France

---

<sup>3</sup> Article en préparation

## **Résumé :**

La musique, étant un matériel capable d'induire des émotions fortes, pourrait de ce fait influencer positivement les capacités de mémoire. En effet, de nombreuses études ont montré que les événements émotionnels étaient mieux mémorisés que les événements neutres. Appelé rehaussement émotionnel de la mémoire, cet effet, dépendant en partie de l'intégrité du lobe temporal médian (LTM), s'accentuerait avec l'allongement du délai de rétention, ce qui suggère l'effet bénéfique des émotions sur le processus de consolidation mnésique. Cependant, les effets respectifs des dimensions d'arousal et de valence sur la consolidation en mémoire musicale restent encore mal connus. Afin d'approfondir nos connaissances sur le rôle du LTM dans le réhaussement émotionnel de la mémoire, nous avons comparé les performances de reconnaissance musicale de patients ayant bénéficié d'une résection du LTM gauche ou droit à celles d'adultes sains. Dans cette étude, les dimensions émotionnelles des extraits musicaux et la durée du délai de rétention ont été manipulées. Les résultats ont montré que les extraits musicaux d'arousal élevé étaient mieux reconnus que ceux d'arousal faible et les extraits musicaux de valence positive étaient mieux reconnus que ceux de valence négative chez tous les participants. De plus, alors qu'aucun effet du délai n'a été retrouvé chez les participants contrôles, les performances des patients présentant une lésion à gauche étaient déficitaires quel que soit le délai alors que les performances des patients présentant une lésion à droite étaient déficitaires uniquement après un délai long. Cela appuie l'idée que le LTM droit contribuerait tout particulièrement à la consolidation des informations musicales en mémoire à long terme. Enfin, la mémoire musicale des patients semblerait relativement préservée par rapport à la mémoire verbale ou visuelle, mais uniquement lorsque le délai séparant la phase d'encodage et la phase de reconnaissance est court. La supériorité de la mémoire musicale sur la mémoire non musicale s'estomperait avec le temps. La consolidation à long terme d'un matériel musical chez les patients serait tout autant déficitaire que celle d'un matériel non musical. En conclusion, malgré la présence d'une lésion du LTM, le rehaussement émotionnel sur la mémoire semble se manifester, suggérant que des régions contralatérales à la lésion ou péri-lésionnelles participeraient au fonctionnement de la mémoire musicale.

**Mot clés :** émotion – mémoire - musicale – consolidation – arousal – valence

## 1. Introduction

La musique est connue pour induire des émotions fortes (Fuentes-Sánchez et al., 2021 ; Juslin, 2013) et pourrait de ce fait influencer positivement les capacités de mémoire. Les émotions que nous ressentons à l'écoute de musique varient selon deux principales dimensions, l'arousal et la valence émotionnelle (Russell, 1980). De nombreux travaux ont démontré que les mots ou les images ayant un contenu émotionnel sont mieux mémorisés que les mots ou les images neutres (pour revue, Hamann, 2001 ; Kensinger, 2004, 2007 ; LaBar & Cabeza, 2006). Cet effet, dépendrait au moins en partie de l'intégrité du lobe temporal médian (LTM) et notamment des connexions amygdalo-hippocampique (pour revue, Phelps, 2004). Appelé rehaussement émotionnel de la mémoire, cet effet s'accroîtrait avec l'allongement du délai qui sépare la phase de présentation du stimulus de la phase de reconnaissance ou de rappel, suggérant l'effet bénéfique des émotions sur le processus de consolidation en mémoire (pour revue, Yonelinas & Ritchey, 2015). Si l'influence des dimensions d'arousal et de valence sur la mémoire musicale ne fait plus de doute (Alonso et al., 2015 ; Eschrich et al., 2005, 2008 ; Nineuil et al., 2020), la contribution respective des dimensions émotionnelles à la consolidation mnésique reste encore mal connue. Examiner l'effet d'une lésion du LTM sur la mémoire d'extraits musicaux en manipulant leurs dimensions émotionnelles d'arousal et de valence devrait améliorer nos connaissances sur le rôle du complexe amygdalo-hippocampique dans le rehaussement émotionnel de la mémoire.

Dans la littérature, l'impact des dimensions émotionnelles d'arousal et de valence sur la mémoire ont généralement été étudiées de manière indépendante. Quelques rares études les ont cependant manipulées conjointement en utilisant un matériel verbal ou imagé. Il a ainsi été montré que les effets de la valence sur la mémoire pouvaient être modulés par ceux de l'arousal, notamment lorsque le délai entre la phase de présentation et le test de mémoire était court (i.e., quelques minutes) (Gomes et al., 2013 ; Kensinger, 2008 ; Li et al., 2018 ; Waring & Kensinger, 2009, 2011). Cependant, d'autres résultats suggèrent que l'arousal et la valence émotionnelle auraient des effets distincts sur la mémoire, en particulier lorsque le délai entre la phase de présentation et le test de mémoire est plus long, variant d'une heure à deux semaines (Comblain et al., 2004 ; Mickley Steinmetz & Kensinger, 2009 ; Ochsner, 2000). Dans ce cas, les images d'arousal élevé ou de valence négative sont respectivement mieux mémorisées que celles d'arousal faible ou de valence positive sans qu'aucune interaction ne soit révélée. Waring & Kensinger (2009) ont confirmé cette dissociation entre les effets de ces dimensions observés

après un délai court et un délai long en évaluant la mémoire émotionnelle après un délai de 10 minutes et un délai de 24 heures. Ainsi, l'existence d'une interaction entre l'arousal et la valence émotionnelle, pouvant dépendre du délai de rétention, est encore controversée.

Les effets respectifs de l'arousal et de la valence sur la reconnaissance ont été mis en évidence dans plusieurs études de neuroimagerie fonctionnelle. Les données ainsi obtenues suggèrent que ces deux dimensions dépendraient de mécanismes cérébraux distincts (Anderson et al., 2003; Kensinger & Corkin, 2004). Les effets de l'arousal dépendraient d'un réseau amygdalo-hippocampique et ceux de la valence d'un réseau hippocampo-préfrontal. Au sein du LTM, les deux réseaux qui sous-tendent l'arousal et la valence émotionnelle impliqueraient l'hippocampe mais seul le réseau impliqué dans les effets de l'arousal recruterait l'amygdale. En examinant les effets des dimensions émotionnelles sur la mémoire de stimuli olfactifs chez des patients présentant une lésion du LTM, l'étude neuropsychologique de Pouliot & Jones-Gotman (2008) confirme les données recueillies en imagerie. En effet, cette étude a montré que l'effet de l'arousal élevé sur la mémoire évaluée après un délai d'une semaine était retrouvé chez les participants contrôles mais pas chez les patients. En revanche, l'effet de la valence négative était retrouvé chez les deux groupes de participants. Une autre étude de LaBar & Phelps (1998) a montré une amélioration de la mémoire émotionnelle des mots d'arousal élevé en condition de rappel différé (vs. rappel immédiat) chez les participants contrôles mais pas chez les patients présentant une lésion du lobe temporal. L'augmentation de la performance après un délai suggère une influence de l'arousal sur le processus de consolidation en mémoire (McGaugh, 2018), processus permettant la stabilisation de la trace mnésique afin de la rendre plus résistante à l'oubli (McGaugh, 2018 ; Stickgold & Walker, 2007). L'ensemble de ces résultats suggère que la présence d'une lésion du LTM pourrait affecter les effets de rehaussement émotionnel liés à l'arousal, notamment lors du processus de consolidation, mais pas ceux liés à la valence. Cela renforce l'idée selon laquelle le LTM jouerait un rôle important dans la consolidation en mémoire de stimuli d'arousal élevé.

Les effets des émotions sur la mémoire semblent se manifester différemment dans le domaine musical. Parmi les quelques études qui ont manipulé les dimensions d'arousal et de valence, celle d'Eschrich et al. (2005) a montré que la reconnaissance d'extraits de musique classique évaluée deux semaines après leur présentation était meilleure pour les extraits musicaux d'arousal élevé et de valence positive que ceux d'arousal faible et de valence négative. Tandis que ces résultats confortent l'effet attendu de l'arousal élevé sur la mémoire obtenu

avec des images et des mots, ils contrastent avec ceux qui montrent que l'effet de valence se manifeste par de meilleures performances mnésiques pour les stimuli négatifs (pour revue, Kensinger, 2007). Dans une étude ultérieure utilisant des extraits de musique de film induisant un ressenti peu positif à très positif, ces mêmes auteurs ont montré que les performances de reconnaissance étaient les meilleures pour les extraits très positifs que pour les extraits moins positifs, soulignant à nouveau l'impact de la valence positive sur la mémoire musicale. Toutefois, aucun effet de l'arousal sur les performances n'a été retrouvé dans cette étude (Eschrich et al., 2008). Dans la continuité de ce travail, une étude d'imagerie cérébrale fonctionnelle a été menée avec le même matériel musical. Cette étude n'a pas permis de répliquer les effets comportementaux précédemment décrits (Altenmüller et al. 2014). En effet, il se peut que la présentation unique des stimuli durant l'encodage, par rapport aux deux écoutes réparties sur deux jours consécutifs dans l'étude d'Eschrich et al. (2008), ait été insuffisante pour induire un effet comportemental des émotions sur la mémoire. Sur la base de ces études, il reste difficile de déterminer si la valence positive seule, la valence négative également, ou encore la valence et l'arousal de manière indépendante ou en interaction sont susceptibles d'influencer les performances de mémoire musicale.

Les études précédemment citées ont évalué la mémoire musicale après un délai long qui variait de 24 heures à deux semaines. Toutefois, deux études ont testé la mémoire émotionnelle en faisant varier, en plus des dimensions émotionnelles, le délai de rétention qui pouvait être court ou long (Alonso et al., 2015 ; Nineuil et al., 2020). Dans la première étude, les participants devaient reconnaître des extraits de musiques symphoniques immédiatement après l'écoute, puis de nouveau après 24 heures (Alonso et al., 2015). Les résultats ont montré que les dimensions d'arousal et de valence influençaient la mémoire différemment en fonction du délai. Lors de la tâche de reconnaissance immédiate, l'effet de la valence variait en fonction de l'arousal. En effet, alors que la valence n'influencait pas la mémoire des extraits d'arousal élevé, elle modulait la reconnaissance des extraits d'arousal faible, les extraits de valence positive étant mieux reconnus que ceux de valence négative. Après un délai de 24 heures, seuls des effets indépendants de l'arousal et de la valence émotionnelle ont été mis en évidence. Ces effets se traduisaient par une meilleure reconnaissance des extraits musicaux de valence négative par rapport à ceux de valence positive et par une meilleure reconnaissance des extraits musicaux d'arousal élevé par rapport à ceux d'arousal faible. Les effets des dimensions émotionnelles sur la mémoire et leur interaction avec le délai de rétention mis en évidence dans le domaine musical semblent partiellement en accord avec les données précédemment décrites

dans le domaine non musical (Kensinger, 2008 ; Ochsner, 2000 ; Waring & Kensinger, 2009). De plus, ces résultats montrent que la valence émotionnelle affecterait différemment la reconnaissance d'extraits musicaux selon le délai de rétention et suggèrent donc que le processus de consolidation mnésique modulerait les effets de la valence émotionnelle sur la mémoire. Enfin, aucun oubli après le délai de 24 heures n'a été constaté, suggérant l'absence d'un effet délétère du délai sur la mémoire musicale. Cependant, il est à noter que lors de la tâche de reconnaissance après un délai de 24 heures dans l'étude d'Alonso et al. (2015), l'ensemble des extraits encodés la veille a été représenté avec de nouveaux extraits. De ce fait, la reconnaissance après un délai de 24 heures a bénéficié d'une présentation additionnelle des stimuli, ce qui a éventuellement pu faciliter la reconnaissance par rapport à la condition immédiate. Afin d'explorer plus précisément l'effet du délai de rétention sur la mémoire émotionnelle, Nineuil et al. (2020) ont adapté le paradigme expérimental de Waring & Kensinger (2009). Ce dernier permettait de tester l'effet du délai de rétention sur les performances mnésiques tout en gardant un nombre d'écoutes constant. A la différence de la précédente étude, la phase d'encodage a été répartie sur deux jours consécutifs, la moitié des stimuli était présentée le jour 1 et l'autre moitié le jour 2. Un unique test de reconnaissance a ainsi été réalisé le jour 2 afin d'évaluer la reconnaissance des extraits musicaux présentés le jour-même et ceux présentés la veille, sans modifier le nombre de présentations des stimuli cibles. La reconnaissance des extraits présentés 15 minutes plus tôt (i.e., jour 2) ou 24 heures plus tôt (i.e., jour 1) a permis d'évaluer les performances mnésiques après un délai court et après un délai long. Les résultats de cette étude ont montré que le rehaussement émotionnel de la mémoire dépendait uniquement de la valence avec un avantage mnésique pour la valence négative en condition de délai court et pour la valence positive en condition de délai long. A la différence de l'étude d'Alonso et al. (2015), aucun effet de l'arousal ou d'interaction entre l'arousal et la valence n'a été mis en évidence. En outre, dans cette étude, les scores de mémoire étaient supérieurs en condition de délai long par rapport à la condition de délai court, le délai permettant de consolider en mémoire ces informations musicales. Ce dernier résultat conforte ceux obtenus par Alonso et al (2015) en indiquant qu'après un délai de 24 heures, la reconnaissance de stimuli musicaux serait stable voire améliorée par rapport à la condition immédiate. L'effet bénéfique du délai de rétention pour le matériel musical permettrait de potentialiser l'effet de rehaussement émotionnel qui se manifesterait par une meilleure consolidation en mémoire des extraits de valence positive.

Une seule étude, à notre connaissance, a évalué la mémoire émotionnelle d'extraits musicaux chez des patients présentant une épilepsie du lobe temporal (Samson et al., 2009). Des extraits musicaux suscitant des émotions de joie, d'apaisement, de peur ou de tristesse étaient présentés et les performances de reconnaissance étaient évaluées après un délai de 24 heures. Les données de cette étude ont montré que les scores des patients et des participants contrôles ne différaient pas lorsqu'il s'agissait de reconnaître des extraits de joie, d'apaisement et de tristesse. En revanche, la reconnaissance des extraits suscitant la peur était déficitaire chez les patients. Ce déficit, vraisemblablement attribuable à un dysfonctionnement de l'amygdale, résulterait d'une difficulté à traiter la peur, bien documentée dans cette population clinique (Gosselin et al., 2005, 2007). Néanmoins, les capacités de reconnaissance musicale de ces patients, globalement bonnes à l'exception des extraits de peur, contrastaient avec leurs troubles sévères de la mémoire verbale, suggérant un rehaussement émotionnel de la mémoire musicale. A la différence des études discutées précédemment, les dimensions émotionnelles n'ont pas été spécifiquement manipulées dans cette étude (Samson et al., 2009). Il reste donc difficile de se prononcer sur l'impact d'une lésion du LTM sur la consolidation en mémoire d'extraits musicaux variant au niveau des dimensions émotionnelles d'arousal et de valence.

Pour explorer cette question, nous avons examiné les performances de mémoire musicale de patients présentant une LTM par comparaison à des participants sains. Dans cette étude, les dimensions émotionnelles des extraits musicaux et la durée du délai séparant la phase d'étude du test de reconnaissance ont été manipulées en utilisant une version modifiée du paradigme précédemment utilisé dans l'étude Nineuil et al. (2020). Dans la présente étude, les extraits de musique symphonique classique ont été remplacés par des musiques de films (Eerola & Vuoskoski, 2011), style musical connu pour déclencher de fortes émotions (Cohen, 2011) et dont nous avons validé les caractéristiques émotionnelles auprès de la population française (Nineuil et al., 2022). L'encodage a été réalisé de manière incidente plutôt qu'intentionnelle, cela favorisant les effets des émotions sur la mémoire (Li et al., 2018). Des tâches de jugements émotionnels d'arousal et de valence lors de la phase d'encodage ont été ajoutés afin d'écarter la présence d'éventuels troubles émotionnels chez les patients. Toutes ces modifications avaient pour objectif d'augmenter l'effet des dimensions émotionnelles sur la mémoire. Enfin, le contexte sanitaire lié à la pandémie du COVID-19 nous a conduits à réaliser les passations en distanciel (i.e., téléconsultation) plutôt qu'en présentiel (i.e., évaluation en face-à-face) comme dans les études précédemment rapportées.

Selon nos hypothèses, l'effet de l'arousal et de la valence émotionnelle sur la mémoire musicale devrait se manifester différemment en fonction du délai. Après un délai court, une interaction entre ces dimensions émotionnelles était attendue. Celle-ci devrait être moins marquée chez les patients présentant une lésion du LTM que chez les participants contrôles. En revanche, après un délai long, des effets indépendants de chacune de ces dimensions étaient prédits. L'avantage mnésique pour les extraits d'arousal élevé, attendu chez les participants contrôles, devrait disparaître chez les patients alors que l'avantage mnésique pour la valence positive devrait se manifester chez tous les participants. La comparaison des scores de mémoire musicale et non musicale, possible chez les patients ayant tous bénéficié d'un bilan neuropsychologique lors de leur investigation clinique, permettra de vérifier si les performances de mémoire musicale étaient supérieures aux performances en mémoire verbale ou visuelle. Enfin, la récente littérature suggère que, outre les effets de l'arousal et de la valence, le niveau de plaisir musical influencerait la mémoire (Ferreri & Rodriguez-Fornells, 2017). De manière exploratoire, nous avons évalué les capacités de jugement de plaisir des patients présentant une lésion du LTM et testé si les extraits jugés comme plus plaisants étaient mieux reconnus.

## 2. Méthodologie

### 2.1. Participants

Des patients ayant subi une résection unilatérale du LTM dans le cadre d'un traitement chirurgical d'une épilepsie pharmaco-résistante à l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière (Paris) ont participé à cette étude. La résection comprenait l'amygdale, différentes parties de l'hippocampe et ses cortex adjacents (i.e., entorhinal, périrhinal et parahippocampique) dans le LTM gauche ou droit. Le volume réséqué des structures du LTM a été calculé par segmentation automatique en utilisant le logiciel *Carestream* (*Carestream Health*, Rochester, USA), puis corrigé manuellement pour une meilleure précision. Les patients étaient exclus de cette étude s'ils répondaient à au moins un des critères suivants : (i) crises épileptiques actives ; (ii) délai post-chirurgical inférieur à un an ou supérieur à 15 ans ; (iii) représentation hémisphérique du langage bilatérale ou à droite, déterminée par une procédure d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ; (iv) lésion cérébrale en dehors de l'aire opérée telle qu'une lésion controlatérale à l'opération ou une lésion impliquant les structures sous-corticales (e.g., ganglions de la base ou prosencéphale basal) ; (v) QI inférieur à 70 selon la *Wechsler Adult Intelligence Scale* (WAIS-IV ; Wechsler, 2014) ; (vi) âge supérieur à 60 ans ; (vii) signes

d'altération des capacités de langage réceptif ou expressif ; (viii) présence de troubles de l'humeur ; (ix) présence d'une amusie.

Des participants contrôles droitiers (Oldfield, 1971) sans antécédents de maladie neurologique ou psychiatrique, âgés de 18 à 60 ans, ont été également inclus dans cette étude.

Tous les participants maîtrisaient le français. Du fait que la procédure utilisée soit en ligne, seuls les participants ayant accès à un ordinateur avec une connexion Internet, une webcam et des écouteurs ou des haut-parleurs ont été recrutés dans cette étude.

Des questionnaires additionnels ont été utilisés afin de vérifier que les groupes de participants ne différaient pas selon leur niveau d'expertise musicale (Questionnaire d'expertise musicale, Ehrlé, 1998), d'hédonisme musical (BMRQ ; *Barcelona Music Reward Questionnaire*; Mas-Herrero et al., 2013) et leur quantité de sommeil (*St. Mary's Hospital Sleep Questionnaire*, Ellis et al., 1981). Une évaluation des troubles de l'humeur a été menée grâce à la *State-Trait Anxiety Inventory state* (STAI-A ; Spielberger, 1983) et à la *Positive Affectivity and Negative Affectivity Scale* (PANAS ; Watson et al., 1988). La présence d'une amusie a été écartée à l'aide d'une tâche de discrimination musicale tirée de la *Montreal Battery of Evaluation of Amusia* (MBEA; Peretz et al., 2003).

L'étude a été menée en respect des principes de la Déclaration d'Helsinki et le protocole a été validé par le Comité Ethique de la Recherche de l'Université de Lille (référence 2021-470-S90).

## 2.2. Matériel

Les stimuli musicaux ont été tirés du *Film Music Stimulus Set* (FMSS ; Eerola & Vuoskoski, 2011), connu pour déclencher des émotions fortes. La durée de chacun des extraits était de 15 secondes ( $\pm 1$  seconde). La Valence émotionnelle (positive vs. négative) et l'Arousal (élevé vs. faible) de ces extraits musicaux ont été précédemment évalués par une population de participants français (Nineuil et al., 2022). Ils ont été utilisés pour créer quatre combinaisons émotionnelles différentes : arousal élevé et valence positive [A+ ; V+] ; arousal élevé et valence négative [A+ ; V-] ; arousal faible et valence positive [A- ; V+] ; arousal faible et valence négative [A- ; V-]. Les huit stimuli par combinaison ayant obtenu le plus haut degré d'accord inter-juges ont été sélectionnés afin de disposer de 32 stimuli, divisés en deux séries équivalentes de 16 stimuli. Une série était utilisée en tant que stimuli cibles tandis que l'autre

était utilisée comme distracteurs, en suivant une procédure de contrebalancement entre les participants.

### 2.3. Procédure

Chaque participant a été évalué individuellement en ligne sur deux jours consécutifs via un outil de visioconférence. Au début de l'expérience, un lien vers la lettre d'information et le formulaire de consentement était envoyé par mail. Il était demandé aux participants d'être seuls, dans un endroit calme, devant un ordinateur disposant d'une connexion Internet, d'une caméra et d'écouteurs ou d'enceintes. Les questionnaires et la tâche expérimentale étaient présentés via la plate-forme en ligne LimeSurvey et le logiciel Psychopy (voir **Figure 5** pour la représentation schématique du protocole expérimental).

Le Jour 1, deux questionnaires étaient administrés : le questionnaire de latéralité manuelle d'Edimbourg (Oldfield, 1971) et le *St. Mary's Hospital Sleep Questionnaire* (Ellis et al., 1981). La première phase d'encodage incident commençait après une tâche d'entraînement visant à familiariser le participant avec les échelles de réponse utilisées dans la tâche de jugement émotionnel et avec les définitions des dimensions émotionnelles. Pendant cette phase d'encodage, la première moitié des stimuli cibles, c'est-à-dire huit extraits (i.e., 2 par combinaison émotionnelle), était présentée dans un ordre aléatoire. Afin d'évaluer leurs capacités de jugement émotionnel, il était demandé aux participants de juger l'arousal et la valence de chaque extrait à l'aide de la *Self-Assessment Manikin Scale* en 5 points (SAM ; Bradley & Lang, 1994 ; l'arousal étant compris de 1 – Très faible à 5 – Très élevé et la valence de 1 – Très négative à 5 – Très positive). La moitié des participants jugeaient l'arousal en premier et l'autre moitié la valence. Ensuite, il a été demandé à chaque participant de juger le niveau de plaisir qu'il ressentait à l'écoute de l'extrait musical. Pour ce faire, une échelle semblable à la SAM a été créée (i.e., échelle en 5 points allant de très désagréable à très agréable ; voir **Figure 7**). Afin de renforcer le processus d'encodage, deux écoutes supplémentaires, sans aucune tâche de jugement émotionnel, était réalisées.

Le Jour 2, soit environ 24 heures plus tard, la deuxième phase d'encodage était réalisée avec la seconde moitié des stimuli cibles. Chaque participant écoutait huit autres extraits musicaux, en suivant la même procédure que celle du Jour 1. Cinq questionnaires étaient ensuite administrés pendant le délai de 15 minutes qui séparait la phase d'encodage de la phase de reconnaissance : le BMRQ (Mas-Herrero et al., 2013), le Questionnaire d'expertise musicale (Ehrlé, 1998), la STAI-A (Spielberger, 1983), la PANAS (Watson et al., 1988) et le *St. Mary's*

*Hospital Sleep Questionnaire* (Ellis et al., 1981). La phase de reconnaissance des stimuli musicaux débutait alors. Durant cette phase, les participants écoutaient les 16 stimuli cibles (i.e., les huit du Jour 1 et les huit du Jour 2), mélangés avec 16 distracteurs présentés dans un ordre aléatoire, afin d'évaluer les performances de reconnaissance mnésique après un délai court (i.e., 15 minutes) et un délai long (i.e., 24 heures). Après chaque présentation, les participants devaient indiquer s'ils avaient déjà entendu l'extrait (oui/non) et attribuer un niveau de confiance à leur réponse (sûr.e/pas sûr.e) en cliquant sur l'une des réponses affichées à l'écran. Il n'y avait pas de temps limite pour répondre et la localisation de chacune des possibilités de réponse sur l'écran était contrebalancée.

A la fin de la session, les participants passaient la tâche de discrimination musicale de la MBEA (Peretz et al., 2003). Les participants devaient juger si les deux séquences mélodiques consécutives étaient identiques ou non, ce qui permettait d'identifier une éventuelle difficulté de perception mélodique.

| Jour 1                                 |                                                                                                                                                                                                 | Jour 2                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Questionnaires et tâche d'entraînement | 1 <sup>ère</sup> phase d'encodage                                                                                                                                                               | 2 <sup>ème</sup> phase d'encodage                                                                                                                                                               | 15 minutes de délai                                                                                                       | Recognition phase                                                                                                                                                                                                                            |
|                                        | 8 extraits musicaux cibles<br>• 2 x [A+,V+] ]<br>• 2 x [A+,V-]<br>• 2 x [A-,V+]<br>• 2 x [A-,V-] ] x 3 fois<br><br>1 <sup>ère</sup> écoute → Jugements :<br>• Valence<br>• Arousal<br>• Plaisir | 8 extraits musicaux cibles<br>• 2 x [A+,V+] ]<br>• 2 x [A+,V-]<br>• 2 x [A-,V+]<br>• 2 x [A-,V-] ] x 3 fois<br><br>1 <sup>ère</sup> écoute → Jugements :<br>• Valence<br>• Arousal<br>• Plaisir | • BMRQ<br>• Questionnaire d'expertise musicale<br>• STAI-A<br>• PANAS<br>• <i>St. Mary's Hospital Sleep Questionnaire</i> | ○ 16 extraits musicaux cibles =<br>• 8 cibles du Jour 1<br>Délai long ≈ 24 heures<br>• 8 cibles du Jour 2<br>Délai court ≈ 15 minutes<br>○ 16 distracteurs<br>Après chaque extrait :<br>• Déjà entendu : oui ou non<br>• Niveau de confiance |

**Figure 5.** Représentation schématique du protocole expérimental

## 2.4. Analyse des données

Des tests indépendants de Wilcoxon-Mann-Whitney et des corrélations de Spearman ont été menés afin d'étudier les liens entre les scores de reconnaissance (i.e., aire sous la courbe ROC) et les différentes variables démographiques et cliniques (i.e., sexe, âge, niveau d'éducation, expertise musicale, hédonisme musical, âge de début de l'épilepsie, nombre de médicaments antiépileptiques, délai post-chirurgical et volume réséqué). Afin de limiter le risque d'erreur de type I, une correction de Bonferroni pour corrélations multiples a été appliquée. Cela correspond à diviser le seuil  $\alpha$  par  $k$  (i.e., le nombre de variables). Pour les patients, cela revient à  $0.05/9 = 0.006$  et pour les participants contrôles à  $0.05/4 = 0.012$ .

Sur la base de la précision des réponses (i.e., oui/non) et de l'évaluation du niveau de confiance en ces réponses (i.e., sûr.e/pas sûr.e), des courbes de ROC (*Receiver Operation Characteristic* ; Yonelinas, 1994) ont été calculées pour chaque participant et pour chaque combinaison émotionnelle. Une ANOVA à quatre facteurs a été menée sur les aires sous la courbe ROC avec l'Arousal (élevé, faible), la Valence (positive, négative) et le Délai de rétention (court, long) comme facteurs intra-sujets et le Groupe (patients présentant une lésion du LTM gauche, patients présentant une lésion du LTM droit, participants contrôles) comme facteur inter-sujets. Quand cela était possible et pertinent, des analyses *post hoc* ont été réalisées.

Afin de s'assurer que les groupes de participants ne différaient pas dans leur capacité à juger les dimensions émotionnelles, les jugements d'arousal et de valence émotionnelle de chaque extrait musical pendant la phase d'encodage ont été analysés via une ANOVA mixte avec pour facteur intra-sujet l'Arousal (élevé, faible) ou la Valence (positive, négative) et inter-sujet le Groupe (patients présentant une lésion du LTM gauche, patients présentant une lésion du LTM droit, participants contrôles). De même, afin de s'assurer que les jugements de plaisir ne diffèrent pas entre les groupes de participants, une ANOVA avec comme facteur inter-sujet le Groupe (patients présentant une lésion du LTM gauche, patients présentant une lésion du LTM droit, participants contrôles) a été réalisée.

Dans le but d'évaluer l'influence du niveau de plaisir sur les performances de reconnaissance, l'évaluation du plaisir (transformée en score Z) et le score de reconnaissance (i.e., le nombre de bonnes reconnaissances moins la moyenne des fausses alarmes) ont été calculés pour chaque extrait musical et chaque participant. Des corrélations de Spearman ont ainsi été menées pour chaque groupe de participants.

Afin de comparer les scores de reconnaissance des informations musicales et des informations non musicales (i.e., mots et dessins) obtenus lors du bilan neuropsychologique, les performances à la tâche de reconnaissance musicale et les performances aux différents tests de mémoire (i.e., nombre de reconnaissances correctes après un délai court ou un délai long) ont été transformées en scores Z par rapport à un groupe contrôle. Les performances ont été comparées à l'aide de tests de Wilcoxon.

### 3. Résultats

Sur les 58 patients répondant à nos critères de sélection et contactés pour participer à cette étude, 7 n'étaient pas libres de crises au moment de l'inclusion, 13 ne disposaient pas du matériel informatique nécessaire et 8 ont refusé. Ainsi, 30 patients ayant bénéficié d'une résection unilatérale du LTM (17 à gauche et 13 à droite) ont participé à cette étude. Sur les 57 participants contrôles contactés, 46 remplissaient les critères de sélection après exclusion des participants ambidextres ( $n = 8$ ), ayant un score déficitaire à la tâche de la MBEA ( $n = 1$ ) ou ayant des scores jugés pathologiques à la PANAS et à la STAI-A ( $n = 2$ ).

La **Table 2** décrit les informations démographiques des trois groupes de participants. Aucune différence significative entre les groupes n'a été retrouvée pour la répartition du sexe, pour l'âge, le niveau d'éducation ou les scores obtenus aux questionnaires d'expertise musicale, d'hédonisme musical, de sommeil ou encore d'humeur.

**Table 2.**

Données démographiques et cliniques des patients présentant une lésion du LTM gauche ou droit et des participants contrôles

|                                        | Patients<br>LTM gauche<br>N=17 | Patients<br>LTM droit<br>N=13 | Participants<br>contrôles<br>N=46 | p‡    |
|----------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------|
| Sexe (femme/homme)                     | 12/5                           | 8/5                           | 38/8                              | .236  |
| Age (année)                            | 43.2 [34.0, 49.0]              | 44.1 [34.0, 54.0]             | 40.3 [33.3, 49.8]                 | .403  |
| Education (année)                      | 14.4 [12.0, 17.0]              | 13.8 [12.0, 17.0]             | 15.1 [14.0, 17.0]                 | .198  |
| Quotient intellectuel                  | 98.2 [94.0, 104.0]             | 95.7 [92.0, 99.0]             | -                                 | .535  |
| Expertise musicale                     | 6.2 [4.0, 8.0]                 | 5.8 [3.0, 7.0]                | 8.6 [4.0, 12.0]                   | .171  |
| BMRQ                                   | 80.0 [76.0, 86.0]              | 82.0 [78.0, 87.0]             | 78.6 [74.3, 84.0]                 | .430  |
| Durée de sommeil de la nuit 1 (heure)  | 7.9 [7.5, 8.7]                 | 8.2 [7.5, 9.0]                | 7.7 [7.0, 8.5]                    | .327  |
| Durée de sommeil de la nuit 2 (heure)  | 7.7 [6.7, 9.0]                 | 7.9 [7.0, 9.0]                | 7.7 [6.8, 8.4]                    | .866  |
| STAI-A                                 | 36.0 [28.0, 42.0]              | 30.0 [27.0, 33.0]             | 37.0 [29.3, 43.8]                 | .137  |
| PANAS – items positifs                 | 32.0 [30.0, 35.0]              | 35.0 [34.0, 37.0]             | 31.0 [27.0, 35.0]                 | .075  |
| PANAS – items négatifs                 | 13.0 [11.0, 22.0]              | 12.0 [11.0, 14.0]             | 13.0 [10.0, 15.0]                 | .556  |
| MBEA                                   | 27.0 [25.8, 28.3]              | 25.0 [21.5, 27.5]             | 28.0 [26.0, 29.0]                 | .083  |
| Age au début de l'épilepsie (année)    | 9.1 [6.0, 12.0]                | 15.0 [7.0, 18.0]              | -                                 | .240  |
| Durée de la maladie (année)            | 29.4 [21.0, 38.0]              | 22.8 [14.0, 30.0]             | -                                 | .126  |
| Nombre de médicaments antiépileptiques | 1.9 [2.0, 2.0]                 | 0.9 [0.0, 1.0]                | -                                 | .011* |
| Délai post-chirurgie (année)           | 4.1 [1.0, 6.0]                 | 5.5 [3.0, 8.0]                | -                                 | .211  |
| Volume réséqué (cm <sup>3</sup> )      | 7.7 [6.6, 8.4]                 | 8.1 [6.3, 10.4]               | -                                 | .867  |

Notes. Les données reportées sont la médiane [premier quartile, troisième quartile] pour les variables continues et les fréquences pour les variables catégorielles.

‡ Des tests de Kruskal-Wallis et du Khi2 ont été utilisés pour comparer les trois groupes en termes de répartition du sexe, d'âge, de nombre d'années d'éducation et des scores obtenus aux différents questionnaires. Des tests indépendants de Wilcoxon-Mann-Whitney ont été utilisés pour comparer les deux groupes de patients en termes de quotient intellectuel, d'âge de début de l'épilepsie, de durée de la maladie, de nombre de médicaments antiépileptiques, de durée depuis la chirurgie et du volume réséqué.

### 3.1. Analyses préliminaires

Le contrebalancement des listes de musiques, l'ordre des jugements émotionnels et la localisation des réponses sur l'écran n'ont aucun effet significatif sur les performances de reconnaissance (tous les  $p > .05$ ).

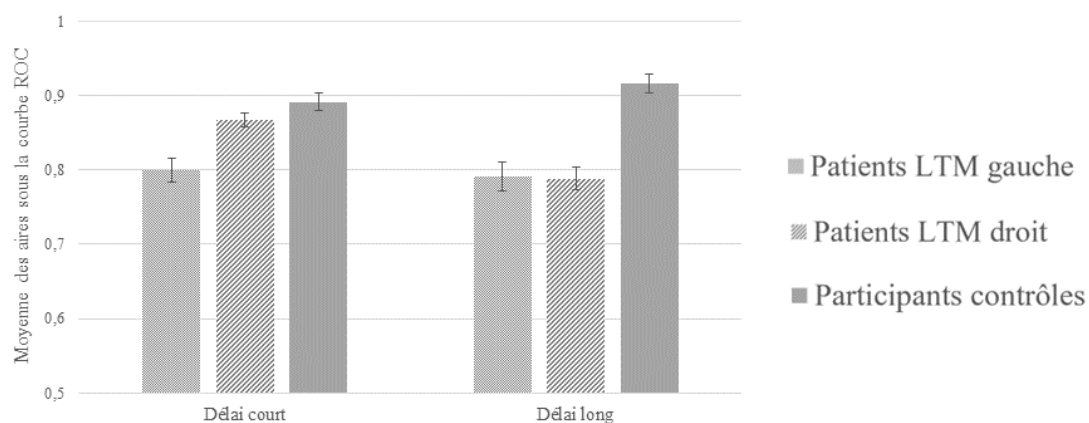
Aucun effet significatif du sexe sur les performances de reconnaissance n'a été retrouvé chez les deux groupes patients ( $p > .05$ ). De même, chez les patients, aucune corrélation significative n'a été observée entre les performances de reconnaissance et l'âge, le nombre d'années d'éducation, le niveau d'expertise musicale, le score au BMRQ, l'âge de début de l'épilepsie, la durée de la maladie, le nombre de médicaments antiépileptiques, le délai post-chirurgie et le volume réséqué (tous les  $p > .006$ ).

Chez les participants contrôles, les analyses n'ont révélé ni un effet significatif du sexe sur les performances de reconnaissance ( $p > .05$ ), ni de corrélation entre les performances de reconnaissance et le niveau d'expertise musicale ou le score au BMRQ (tous les  $p > .012$ ). Une corrélation négative significative entre les performances de reconnaissance et l'âge ( $r = -0.57$  ;  $p < .001$ ) et une corrélation positive significative entre les performances de reconnaissance et le nombre d'années d'éducation ( $r = 0.40$  ;  $p = .007$ ) sont retrouvées. Les participants contrôles plus jeunes et ceux avec un plus grand nombre d'années d'éducation avaient de meilleures performances.

### 3.2. Performances de reconnaissance musicale

Une ANOVA à quatre facteurs a été menée avec l'Arousal, la Valence et le Délai de rétention comme facteurs intra-sujets et le Groupe comme facteur inter-sujets. Les analyses ont montré une interaction entre le Groupe et le Délai ( $F(2,73) = 4.80$  ;  $p = .011$ ;  $\eta^2p = .116$ ) comme illustré sur la **Figure 6**. Les analyses *post hoc* ont révélé que, après un délai court, l'aire moyenne sous la courbe ROC était plus faible pour les patients présentant une lésion du LTM gauche (moyenne  $\pm$  ET =  $0.80 \pm 0.14$ ) que pour les participants contrôles (moyenne  $\pm$  ET =  $0.89 \pm 0.10$ ;  $p = .047$ ), mais pas pour les patients présentant une lésion du LTM droit (moyenne  $\pm$  ET =  $0.87 \pm 0.08$ ;  $p = .980$ ). De plus, après un délai long, l'aire moyenne sous la courbe ROC était plus faible pour les patients présentant une lésion du LTM gauche (moyenne  $\pm$  ET =  $0.80 \pm 0.17$ ;  $p = .015$ ) et les patients présentant une lésion du LTM droit (moyenne  $\pm$  ET =  $0.79 \pm 0.13$ ;  $p = .028$ ) que pour les participants contrôles (moyenne  $\pm$  ET =  $0.92 \pm 0.11$ ).

Les analyses ont révélé un effet principal de l'Arousal ( $F(1,73) = 13.00$  ;  $p < .001$  ;  $\eta^2p = .151$ ). L'aire moyenne sous la courbe ROC était plus élevée pour les extraits d'arousal élevé (moyenne  $\pm$  ET =  $0.90 \pm 0.18$ ) que pour les extraits d'arousal faible (moyenne  $\pm$  ET =  $0.84 \pm 0.23$ ). Les analyses ont également montré un effet principal de la Valence ( $F(1,73) = 4.21$  ;  $p = .044$ ;  $\eta^2p = .055$ ). L'aire moyenne d'aire sous la courbe ROC était plus élevée pour les extraits de valence positive (moyenne  $\pm$  ET =  $0.88 \pm 0.20$ ) que pour les extraits de valence négative (moyenne  $\pm$  ET =  $0.85 \pm 0.22$ ). Enfin, il a été observé un effet principal du Groupe ( $F(2,73) = 7.31$  ;  $p < .001$ ;  $\eta^2p = .167$ ), l'aire moyenne sous la courbe ROC était plus basse pour les patients présentant une lésion du LTM gauche (moyenne  $\pm$  ET =  $0.80 \pm 0.15$ ) que pour les participants contrôles (moyenne  $\pm$  ET =  $0.90 \pm 0.09$ ;  $p = .002$ ). Cependant, les aires moyennes sous la courbe ROC ne différaient pas significativement entre les patients présentant une lésion du LTM droit (moyenne  $\pm$  ET =  $0.83 \pm 0.09$ ) et les participants contrôles ( $p = .067$ ). Aucun effet significatif du délai ( $F(1,73) = 2.16$  ;  $p = .146$ ) ou d'autre effet d'interaction entre Arousal, Valence et Groupe ( $F(1,73) = 0.84$  ;  $p = .43$ ) n'ont été retrouvés.



**Figure 6.** Aires moyennes sous la courbe ROC des patients présentant une lésion du LTM gauche ou droit et des participants contrôles en fonction du délai de rétention (court vs. long)

Notes. L'origine est fixée au niveau du hasard (0.50). Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards à la moyenne.

### 3.3. Jugements émotionnels musicaux

Une ANOVA mixte avec pour facteur intra-sujet l'Arousal et inter-sujet le Groupe a été réalisée afin de comparer les jugements des extraits d'arousal élevé ou faible entre les groupes de participants (voir **Table 3**). Les analyses ont révélé un effet principal de l'Arousal ( $F(1,146) = 44.17$  ;  $p < .001$  ;  $\eta^2p = .232$ ), avec les extraits d'arousal élevé jugés comme étant

plus *arousing* que les extraits d'arousal faible. Aucun effet principal du Groupe ( $F(2,146) = 2.95$  ;  $p = .055$ ) ni d'interaction entre les variables ( $F(2,146) = 2.39$  ;  $p = .095$ ) n'ont été observés.

Une ANOVA mixte avec pour facteur intra-sujet la Valence et pour facteur inter-sujet le Groupe a été menée afin de comparer les jugements des extraits de valence positive ou négative entre les groupes de participants (voir **Table 3**). Les résultats révèlent une interaction entre Valence et Groupe ( $F(2,146) = 3.27$  ;  $p = .041$  ;  $\eta^2p = .043$ ). Bien que les analyses *post hoc* aient montré que les extraits de valence positive étaient jugés comme plus positifs que les extraits de valence négative par les trois groupes (patients présentant une lésion du LTM gauche :  $p < .001$  ; patients présentant une lésion du LTM droit :  $p = .005$  ; participants contrôles :  $p < .001$ ), la valence moyenne des extraits de valence négative des patients présentant une lésion du LTM droit était moins négative que celle des participants contrôles ( $p = .004$ ). Un effet principal de la Valence ( $F(1,146) = 104.00$  ;  $p < .001$  ;  $\eta^2p = .416$ ) est retrouvé avec les extraits de valence positive jugés plus positifs que les extraits de valence négative. Il est également retrouvé un effet principal du Groupe ( $F(2,146) = 4.34$  ;  $p = .015$  ;  $\eta^2p = .056$ ), avec des jugements de valence plus élevés chez les patients présentant une lésion du LTM droit que chez les participants contrôles ( $p = .012$ ).

**Table 3.**

Moyenne des jugements d'arousal et de valence émotionnelle obtenus avec une échelle en 5 points par les patients présentant une lésion du LTM gauche ou droite et des participants contrôles

|                              | Patients<br>LTM gauche<br>N=17 | Patients<br>LTM droit<br>N=13 | Participants<br>contrôles<br>N=46 |
|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Extraits d'arousal élevé     | 3.7 [3.2, 4.1]                 | 3.8 [3.7, 4.1]                | 3.8 [3.5, 4.1]                    |
| Extraits d'arousal faible    | 3.1 [2.7, 3.4]                 | 3.2 [2.6, 3.6]                | 2.6 [2.1, 3.2]                    |
| Extraits de valence positive | 3.7 [3.6, 3.8]                 | 3.8 [3.6, 4.0]                | 3.8 [3.5, 4.1]                    |
| Extraits de valence négative | 2.8 [2.4, 3.2]                 | 3.1 [2.5, 3.6]                | 2.5 [2.0, 2.7]                    |

Notes. Les données reportées sont la médiane [premier quartile, troisième quartile].

### 3.4. Analyses complémentaires

Les patients ayant bénéficié d'un bilan neuropsychologique lors de leur investigation clinique (voir la **Table 6** pour des données neuropsychologiques additionnelles), nous avons pu comparer leurs scores de reconnaissance avec des informations musicales et des informations non musicales (i.e., mots et dessins).

Après un délai court, il a été observé que les scores Z des patients présentant une lésion du LTM gauche étaient plus élevés pour la tâche de reconnaissance musicale que pour la tâche de reconnaissance verbale ( $W = 99.0$  ;  $p = 0.026$ ). Cette différence n'est pas retrouvée chez les patients présentant une lésion du LTM droit ( $p > .05$  ; voir **Table 4**). Après un délai court, les scores Z des patients présentant une lésion du LTM droit étaient plus élevés pour la tâche de reconnaissance musicale que pour la tâche de reconnaissance visuelle ( $W = 68.0$  ;  $p = .025$ ). Cette différence n'est pas retrouvée chez les patients présentant une lésion du LTM gauche ( $p > .05$ ). Enfin, après un délai long, les scores Z des patients présentant une lésion du LTM gauche et des patients présentant une lésion du LTM droit ne différaient pas entre les tâches de reconnaissance musicale et verbale ( $p > .05$  ; voir **Table 5**).

**Table 4.**

Moyenne des scores Z obtenus par les patients présentant une lésion du LTM gauche ou droit aux tâches de reconnaissance de mémoire musicale, verbale ou visuelle après un délai court (i.e., environ 15 minutes)

|                        | Reconnaissance<br>musicale (a) | Reconnaissance<br>visuelle (b) | Reconnaissance<br>verbale (c) | $p^{\dagger}$ |
|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------|
| Patients<br>LTM gauche | $-0.4 \pm 1.3$ (c)             | $-0.6 \pm 1.9$                 | $-3.7 \pm 4.2$ (a)            | .026*         |
| Patients<br>LTM droit  | $0.0 \pm 0.8$ (b)              | $-0.9 \pm 1.9$ (a)             | $0.1 \pm 0.8$                 | .025*         |

Notes. Les données reportées sont les moyennes  $\pm$  les écart-type.

La tâche de reconnaissance visuelle correspond aux scores de reconnaissance obtenus au *Aggie Figures Learning Test* (Majdan et al., 1996) et la tâche de reconnaissance verbale aux scores de reconnaissance obtenus au *Rey Auditory Verbal Learning test* (Schmidt, 1996)

**Table 5.**

Moyenne des scores Z obtenus par les patients présentant une lésion du LTM gauche ou droit aux tâches de reconnaissance de mémoire musicale ou verbale après un délai long (i.e., environ 24 heures)

|                     | Reconnaissance musicale | Reconnaissance verbale | p <sup>‡</sup> |
|---------------------|-------------------------|------------------------|----------------|
| Patients LTM gauche | -0.8 ± 1.4              | -3.7 ± 4.2             | .08            |
| Patients LTM droit  | -1.2 ± 1.6              | 0.1 ± 0.8              | .09            |

Notes. Les données reportées sont les moyennes ± les écart-type.

La tâche de reconnaissance visuelle correspond aux scores de reconnaissance obtenus au *Abstract words Learning Test* (Jones-Gotman, 1997).

#### 4. Discussion

L'objectif de cette étude était de préciser le rôle du LTM dans la mémoire émotionnelle musicale et notamment dans le phénomène de rehaussement émotionnel de la mémoire. Pour ce faire, des extraits musicaux variant selon les dimensions émotionnelles d'arousal et de valence ont été sélectionnés et utilisés dans un test de mémoire musicale qui présentait la particularité d'évaluer la mémoire après un délai court (i.e., 15 minutes) et après un délai long (i.e., 24 heures). Cette procédure a permis d'examiner l'impact des dimensions émotionnelles sur le processus de consolidation mnésique chez des patients présentant une lésion du LTM droit ou gauche et chez des volontaires sains. Compte tenu du contexte sanitaire lié à la pandémie du COVID-19, nous avons été contraints de réaliser cette étude en ligne (i.e., téléconsultation), ce qui nous a donné l'opportunité de vérifier la faisabilité des évaluations à distance auprès de cette population clinique. Les résultats de cette étude ont mis en évidence des effets distincts et indépendants des dimensions émotionnelles sur la mémoire musicale. Ainsi, les extraits musicaux d'arousal élevé étaient mieux reconnus que ceux d'arousal faible et les extraits musicaux de valence positive étaient mieux reconnus que ceux de valence négative pour tous les participants et ce quel que soit le délai. Ce rehaussement émotionnel de la mémoire pour les extraits d'arousal élevé, d'une part, et pour ceux de valence positive, d'autre part, observé chez les participants contrôles était également présent chez les patients. De plus, seules les performances des patients ont été impactées par le délai. Les performances des patients présentant une lésion du LTM droit n'étaient pas déficitaires par comparaison aux participants contrôles lorsque le délai était court, mais elles l'étaient lorsque le délai était long.

Les performances des patients présentant une lésion du LTM gauche étaient, quant à elles, déficitaires et ce quelle que soit la durée du délai. Enfin, les comparaisons intra-individuelles des scores de reconnaissance musicale de la présente étude aux scores obtenus aux tests de mémoire du bilan neuropsychologique ont révélé chez les patients la supériorité relative des aptitudes de mémoire musicale par rapport aux aptitudes de mémoire verbale ou visuelle lorsque le délai était court, mais pas lorsqu'il était long.

Les résultats obtenus ont mis en évidence un effet distinct et séparé des dimensions émotionnelles d'arousal et de valence sur la mémoire musicale. Toutefois, l'absence d'interaction entre l'effet de ces dimensions émotionnelles et les délais de rétention suggère, contrairement à nos attentes, que ces dimensions n'ont pas eu d'impact sur la consolidation mnésique. Ainsi, le délai séparant la présentation des extraits de la phase de test ne semble pas avoir influencé l'effet de ces dimensions émotionnelles sur la mémoire. En effet, quel que soit le délai, les stimuli d'arousal élevé étaient mieux mémorisés que ceux d'arousal faible et ceux de valence positive étaient mieux mémorisés que ceux de valence négative. L'avantage mnésique de l'arousal confirme un effet bien décrit dans la littérature avec un matériel verbal et pictural (pour revue, Hamann, 2001), mais également avec un matériel musical (Alonso et al., 2015 ; Eschrich et al., 2005, 2008). De plus, quel que soit le délai de rétention (i.e., immédiat, une heure, plusieurs semaines ou années), les performances de reconnaissance des stimuli d'arousal élevé resteraient toujours supérieures à celles des stimuli d'arousal faible (Bradley et al., 1992 ; Cahill & McGaugh, 1995 ; Ochsner, 2000 ; Wagner et al., 2006), conformément à nos résultats. Cependant, contrairement à d'autres études réalisées avec un matériel non musical, nous n'avons pas réussi à montrer que le délai renforcerait l'effet de l'arousal sur la mémoire (LaBar & Phelps, 1998 ; McGaugh, 2018).

Concernant la valence émotionnelle, son avantage mnésique n'a pas été systématiquement observé dans la littérature musicale (Altenmüller et al., 2014). Lorsqu'il l'était, le sens des effets apparaissait différent d'une étude à une autre (Alonso et al., 2015 ; Eschrich et al., 2005, 2008 ; Nineuil et al., 2020), si bien que les effets de la valence sont encore à éclaircir. Il a été suggéré que l'effet de rehaussement émotionnel dépendant de la valence pouvait varier en fonction du délai de rétention (Nineuil et al., 2020), mais aussi du niveau d'arousal (Alonso et al., 2015). Ainsi, dans un test de reconnaissance musicale réalisé immédiatement (i.e., sans délai) après la phase d'encodage, les extraits musicaux de valence positive étaient mieux reconnus que ceux de valence négative uniquement pour les stimuli

d'arousal faible tandis qu'après un délai de 24 heures, les extraits musicaux de valence négative étaient mieux reconnus que ceux de valence positive (Alonso et al., 2015). En utilisant les mêmes extraits musicaux dans un paradigme permettant de comparer deux délais (i.e., un délai court de 15 minutes vs. un délai long de 24 heures), nous avons mis en évidence que les extraits de valence négative étaient mieux reconnus que ceux de valence positive après un délai court alors que l'inverse était observé après un délai long (Nineuil et al., 2020). Dans cette dernière étude, les effets de la valence sur la mémoire ne variaient pas selon le niveau d'arousal. Au final, l'effet de rehaussement émotionnel de la mémoire pour les extraits de valence positive a été observé soit uniquement pour les stimuli d'arousal faible et sans délai (Alonso et al., 2015) soit après un délai long incluant une période de sommeil (Eschrich et al., 2005, 2008 ; Nineuil et al., 2020). L'ensemble de ces résultats révèle donc une certaine instabilité dans la manifestation des effets de la valence sur la mémoire musicale. En revanche, il est à noter que l'avantage mnésique pour les stimuli de valence positive retrouvé après un délai d'au moins 24 heures par plusieurs études (Eschrich et al., 2005, 2008 ; Nineuil et al., 2020) suggère que cet effet pourrait être lié au processus de consolidation mnésique. Dans notre cas, la valence positive a eu un impact sur la mémoire musicale, quel que soit le délai, soulignant l'efficacité de cette dimension émotionnelle pour renforcer la trace mnésique et peut être même déjà après un délai court. La valence positive est souvent associée à une expérience agréable et plaisante. Or, selon les résultats d'une étude récente, ce serait le plaisir procuré par l'écoute musicale plutôt que les dimensions émotionnelles qui améliorerait la mémoire musicale (Ferrerri & Rodriguez-Fornells, 2017). Il est vrai que la musique, de par le plaisir qu'elle peut engendrer, activerait le circuit cérébral de la récompense (Blood & Zatorre, 2001 ; Gold et al., 2019 ; Salimpoor et al., 2011, 2013). Ainsi, la musique, via l'activation du système de récompense, pourrait déclencher une libération de neurotransmetteurs dont la dopamine qui pourrait améliorer l'encodage des informations en mémoire (Ferrerri & Rodriguez-Fornells, 2022 ; Ripollés et al., 2016, 2018). Dans notre étude, l'analyse des jugements de plaisir, recueillis à titre exploratoire, n'a pas mis en évidence de différences entre les groupes de participants. La moyenne des jugements de plaisir des extraits n'a été que rarement au-dessous de trois (i.e., niveau médian de plaisir). Tous les extraits étaient donc jugés en moyenne comme plaisants voire très plaisants, ce qui pourrait expliquer pourquoi aucun effet du plaisir n'a été retrouvé sur les performances de reconnaissance dans notre étude. Ces différences liées au plaisir suscité par l'écoute des extraits musicaux pourraient également expliquer les divergences entre les résultats de la présente étude et ceux d'Alonso et al. (2015) et de Nineuil et al. (2020). En effet,

en utilisant des extraits symphoniques qui semblaient moins plaisants selon les remarques des participants, ces études ont pu révéler des effets de la valence négative sur la mémoire, effets non observés dans la présente étude. Enfin, une autre hypothèse pouvant expliquer le bénéfice de la valence positive sur la mémoire est l'existence d'un biais attentionnel au profit de ces stimuli. En effet, la méta-analyse de Pool et al. (2016) a révélé que le niveau de biais attentionnel pour les stimuli de valence positive par rapport à des stimuli neutres variait en fonction du niveau d'arousal, mais surtout en fonction de la pertinence par rapport à des besoins spécifiques (e.g., la faim). Le niveau d'attention porté sur les stimuli jugés pertinents serait plus important que celui porté sur les stimuli jugés non pertinents et ils seraient ainsi mieux mémorisés (Montagrin et al., 2013). Nous pouvons donc nous demander si les extraits musicaux de valence positive n'ont pas été considérés comme plus pertinents, du fait de leur capacité à induire chez les participants un sentiment de bien-être supérieur à celui induit à l'écoute d'extraits de valence négative.

De manière surprenante, l'influence de chacune de ces dimensions émotionnelles sur la mémoire musicale ne semble pas être affectée par la présence d'une lésion du LTM, incluant l'amygdale, à droite ou à gauche. En effet, une lésion de l'amygdale n'a pas affecté comme attendu l'avantage mnésique de l'arousal (Åhs et al., 2010 ; Pouliot & Jones-Gotman, 2008). Étant donné que la lésion était unilatérale, il se pourrait que la réserve fonctionnelle des régions controlatérales à la lésion ait permis de compenser un éventuel déficit. En effet, l'encodage de stimuli émotionnels serait associé à des activations cérébrales bilatérales des amygdales (voir méta-analyse, Murty et al., 2010). Si tel est le cas, il se pourrait que l'intégrité de l'amygdale controlésionnelle suffise au bon fonctionnement de la mémoire émotionnelle. Cependant, une telle interprétation ne semble pas compatible avec les résultats apportés par Pouliot & Jones-Gotman (2008) ou encore Åhs et al. (2010), qui portaient sur des patients comparables à ceux examinés dans notre étude. En effet, ces études ont montré qu'une lésion unilatérale du LTM entraînait une diminution de l'effet de l'arousal sur la mémoire. Néanmoins, ces études utilisaient des odeurs ou des images et non des extraits musicaux. Ces résultats pourraient donc laisser penser que la musique serait capable de générer des émotions plus intenses ou excitantes qui pourraient moduler les performances mnésiques des patients malgré leurs lésions.

À la différence de notre précédente étude (Nineuil et al., 2020), nos résultats n'ont pas révélé d'effet du délai sur les performances des participants contrôles, en revanche, des effets ont été retrouvés chez les patients. Selon le modèle du *binding* émotionnel décrit par Yonelinas

& Ritchey (2015), les souvenirs épisodiques émotionnels seraient oubliés moins rapidement que les souvenirs épisodiques neutres. En accord avec ce modèle, il se pourrait que les extraits musicaux qui procurent des émotions plus fortes résistent mieux à l'oubli que des stimuli moins marqués émotionnellement. En effet, l'effet des dimensions émotionnelles était présent quelques minutes après la phase d'encodage (i.e., dès la condition de délai court) et persistait ensuite, suggérant que ces effets émotionnels se sont manifestés rapidement après la phase de présentation des stimuli. Les extraits musicaux sélectionnés ici sont des extraits de musiques de film qui, comme le démontre l'étude physiologique de Fuentes-Sánchez et al. (2021), sont capables de déclencher rapidement des réponses émotionnelles. Ces extraits auraient induit des émotions plus riches et variées que les musiques symphoniques précédemment utilisées dans les études d'Alonso et al. (2015) et de Nineuil et al. (2020). Ainsi, en induisant des émotions plus fortes, les extraits de musique de film auraient eu un impact plus important et rapide sur la mémoire. De plus, il est vrai que tous les participants, patients ou témoins, avaient jugé sans difficulté les dimensions d'arousal et de valence émotionnelle des extraits de notre étude. Ces données suggèrent que ces jugements émotionnels, en lien avec le ressenti émotionnel, ne sont pas affectés par la présence d'une lésion du LTM confirmant des données précédemment obtenues auprès de cette même population clinique (Dellacherie et al., 2011). Seuls, les patients présentant une lésion du LTM droit semblaient moins sensibles aux variations de la valence. Malgré cette altération du jugement, les dimensions émotionnelles, dont celle de valence, ont modulé les performances mnésiques de ces patients. Ces résultats suggèrent une dissociation entre les capacités de jugement émotionnel et celles de la mémoire émotionnelle, dissociation déjà rapportée dans des études portant sur la mémoire verbale, visuelle ou olfactive (Adolphs, 2000 ; Buchanan et al., 2001 ; LaBar & Phelps, 1998 ; Phelps et al., 1997 ; Pouliot & Jones-Gotman, 2008).

D'autres facteurs ont également pu contribuer à l'impact des dimensions émotionnelles sur les performances mnésiques, qui semblait beaucoup plus marqué que dans notre précédente étude (Nineuil et al., 2020). Tout d'abord, un apprentissage incident plutôt qu'intentionnel a été utilisé étant donné que l'apprentissage incident serait susceptible d'accentuer les effets émotionnels sur la mémoire (Li et al., 2018). De plus, alors qu'aucun jugement n'était demandé dans l'étude précédente, des jugements émotionnels d'arousal et de valence ont été réalisés durant la phase d'encodage. Comme l'ont évoqué Halpern & Müllensiefen (2008), un jugement émotionnel induirait un traitement profond de l'information. Sachant qu'un encodage profond amènerait à des meilleures performances de mémoire qu'un encodage superficiel (Craig &

Lockhart, 1972), les jugements émotionnels réalisés durant l'encodage des stimuli ont certainement contribué à améliorer les performances de reconnaissance dans notre étude. Ces différents changements au niveau du style musical (i.e., musique de film), du type d'apprentissage (i.e., apprentissage incident) et de la nature de l'encodage (i.e., encodage profond) sont autant de facteurs qui ont pu augmenter l'impact des dimensions émotionnelles sur la mémoire et améliorer ainsi les performances de reconnaissance. En accord avec ces arguments, le score moyen de reconnaissance obtenu dans la présente étude (i.e., aire moyenne sous la courbe ROC = 0.90) était supérieur à celui obtenu dans notre précédente étude (i.e., aire moyenne sous la courbe ROC = 0.81) (Nineuil et al., 2020) et ce même si le nombre de présentations des stimuli au moment de l'encodage était identique. Ces résultats confortent l'idée que ces modifications méthodologiques ont eu un effet sur les performances mnésiques. De plus, les performances de reconnaissance des stimuli de valence positive dès le délai court ont été plus élevées dans la présente étude (i.e., aire moyenne sous la courbe ROC = .92) que dans l'étude de Nineuil et al. (2020) (aire moyenne sous la courbe ROC = .74). Dans la présente étude, l'amplitude d'augmentation était alors plus faible, ce qui pourrait expliquer l'absence d'augmentation des performances avec le délai. Bien que ces différences méthodologiques aient vraisemblablement modulé les performances de mémoire, il est difficile aujourd'hui de savoir si les manipulations expérimentales permettant de favoriser la consolidation mnésique ont minimisé les effets propres à la musique ou, au contraire, permis de mieux les mettre en lumière.

Une autre particularité de cette étude concerne le contexte expérimental. Tandis que, jusqu'à présent, toutes les études réalisées dans ce domaine ont été menées en présentiel (i.e., en face-à-face), la présente étude a été réalisée au cours d'une téléconsultation (i.e., en distanciel). Cependant, il est à noter que les performances des participants contrôles ayant effectué la tâche en présentiel avant la période de pandémie liée au COVID-19 (i.e., aire moyenne sous la courbe ROC = .90) ne différaient pas de celles des participants contrôles ayant effectué la passation en téléconsultation (i.e., aire moyenne sous la courbe ROC = .90). Le contexte expérimental (i.e., présentiel ou distanciel) n'aurait donc pas eu d'effet sur les performances dans cette tâche de mémoire musicale. Néanmoins, lors d'une étude en téléconsultation, à la différence des études en ligne, l'expérimentateur garde un contact permanent avec le participant grâce à la visioconférence, limitant ainsi les sources de variabilité et les événements indésirables qui caractérisent souvent les passations en ligne. Même si la téléconsultation permet d'acquérir des données comportementales qui semblent comparables à

celles obtenues en face à face, le recrutement des patients n'a pas été aisé. Plusieurs patients n'ont pas pu participer à l'étude ne disposant pas de l'équipement informatique nécessaire (i.e., 22%) et d'autres ont refusé de participer (i.e., 14%). Malgré ces difficultés d'inclusion, nous pouvons considérer que ces données recueillies lors d'une évaluation à distance sont valides et ouvrent des perspectives prometteuses pour le futur en apportant des preuves convaincantes sur la faisabilité des protocoles en distanciel. Ce type d'évaluation permet d'élargir les possibilités d'évaluation neuropsychologique des participants qui ont des difficultés à se déplacer ou qui résident dans des régions éloignées (Brearly et al., 2017).

Bien que l'influence des dimensions émotionnelles sur les performances mnésiques ait été mise en évidence chez tous les participants, la mémoire musicale des patients semblait différemment affectée selon la latéralisation de la lésion. La présence d'une lésion du LTM gauche a systématiquement perturbé la mémoire musicale en condition de délai court et de délai long alors que la présence d'une lésion comparable à droite a affecté la mémoire musicale uniquement après un long délai. Ces résultats suggèrent une implication bilatérale des LTM dans la mémoire musicale avec, de manière surprenante, une contribution du LTM gauche qui semble plus importante que celle du LTM droit. Compte tenu du rôle du lobe temporal droit dans le traitement musical et dans la mémoire musicale (Samson, 1999 ; Watanabe et al., 2008), il reste étonnant que les patients avec une lésion gauche et non ceux avec une lésion droite présentent un déficit de reconnaissance après un délai court. Ce résultat ne semble pas s'expliquer par une organisation cérébrale différente étant donné que tous les patients avaient le langage représenté de manière prédominante dans l'hémisphère gauche. Il ne semble pas non plus que d'autres différences entre les groupes aient pu expliquer ces effets étant donné qu'ils étaient appariés au niveau des variables démographiques (i.e., âge, sexe, éducation, quotient intellectuel, score d'expertise musicale) et que leur niveau d'hédonisme musical (i.e., score au BMRQ), d'humeur (i.e., STAI-A et PANAS) ou leur durée de sommeil ne différaient pas entre les groupes de participants. Seul le nombre de médicaments antiépileptiques différaient entre les groupes de patients, sans qu'aucun effet de cette variable n'ait été trouvé sur les performances de reconnaissance des patients. À noter qu'aucun effet de l'âge du début de l'épilepsie, de la durée de la maladie, du délai depuis la chirurgie ou encore du volume de la résection du lobe temporal n'a été retrouvé. Cependant, au vu de notre faible effectif, il est prématuré d'écarter une possible influence de ces facteurs sur les performances de reconnaissance musicale. Plusieurs études ont noté une perte plus marquée de l'effet des émotions sur la mémoire chez les patients présentant une lésion du LTM gauche (Buchanan et

al., 2001 ; Carvajal et al., 2020 ; Frank & Tomaz, 2003 ; Phelps et al., 1997). Ces résultats suggèrent, de manière surprenante, une contribution plus importante du lobe temporal gauche dans la mémoire émotionnelle, résultat qui mérite d'être confirmé. À la différence des patients présentant une lésion du LTM gauche, les scores de reconnaissance musicale des patients présentant une lésion du LTM droit étaient déficitaires par rapport aux participants contrôles uniquement après un long délai. Ce déficit de reconnaissance après un délai de 24 heures chez les patients présentant une lésion du LTM droit pourrait s'expliquer par un défaut de consolidation en mémoire musicale déjà retrouvé dans l'étude de Samson & Zatorre (1992), ne prenant pas en compte la dimension émotionnelle de la musique. Les scores des patients avec une lésion comparable à gauche restent toutefois difficiles à expliquer et il faut rester prudent quant à l'interprétation de ces résultats compte tenu du nombre encore limité de patients examinés.

Les patients, ayant tous bénéficié d'un bilan neuropsychologique, des analyses complémentaires comparant les scores standardisés (i.e., scores Z) obtenus aux tâches de reconnaissance de mots et de dessins à ceux obtenus à la tâche de reconnaissance d'extraits musicaux dans des conditions de délai comparables ont été réalisées. Comme discuté précédemment, la mémoire musicale des patients présentant une lésion du LTM gauche, qui était déficitaire par rapport aux participants contrôles, restait néanmoins plus performante que la mémoire verbale après un délai court, témoignant d'un déficit de mémoire musicale moins important que celui de mémoire verbale chez ces patients. De plus, il est apparu que les scores de reconnaissance musicale des patients présentant une lésion du LTM droit étaient supérieurs aux scores de reconnaissance visuelle après un délai court. Cependant, les analyses des scores obtenus après un délai long ont mis en évidence un tout autre profil de résultats. L'ampleur du déficit de la mémoire musicale ne se différenciait pas de l'ampleur du déficit de la mémoire verbale chez les patients présentant une lésion du LTM droit ou gauche. Il semble donc que les capacités de mémoire musicale pourraient surpasser celles de mémoire verbale et visuelle lors de la construction de la trace mnésique chez ces patients. La présence d'une lésion unilatérale du LTM pourrait avoir des effets sur la mémoire moins marqués dans le domaine musical que dans le domaine verbal ou pictural. A nouveau des études ultérieures seront nécessaires pour confirmer cette observation. Ce résultat peut s'expliquer par l'implication dans la mémoire musicale de régions contralatérales du LTM et/ou d'autres régions du cortex temporal non touchées par la résection qui seraient encore fonctionnelles. En revanche, les déficits de la reconnaissance après un long délai concernaient non seulement la mémoire verbale, mais

également la mémoire musicale, qui ne bénéficierait dans ce cas plus d'aucun avantage mnésique. Ainsi, la présence d'une lésion du LTM droit ou gauche affecterait la mise en mémoire à plus long terme des informations qu'elles soient musicales ou verbales. Pour une raison qui reste encore inexpliquée, la supériorité de la mémoire musicale sur la mémoire non musicale s'estomperait avec le temps dans notre étude, ce qui semble surprenant par rapport à l'impact souvent décrit de la musique pour faciliter le rappel de souvenirs autobiographiques (Belfi et al., 2016; Groussard et al., 2019).

Pour conclure, les résultats de cette étude ont mis en évidence des effets distincts et indépendants des dimensions émotionnelles sur la mémoire musicale. Ces effets observés chez tous les participants, qu'ils aient une lésion du LTM ou non, ont montré que les extraits musicaux d'arousal élevé étaient mieux reconnus que ceux d'arousal faible et les extraits musicaux de valence positive étaient mieux reconnus que ceux de valence négative, quel que soit le délai. Malgré la présence d'une lésion unilatérale du LTM, le rehaussement émotionnel sur la mémoire semble se manifester. Il se pourrait que les régions contralatérales à la lésion ou péri-lésionnelles participent au fonctionnement de la mémoire émotionnelle dans le domaine musical, mais cela reste à confirmer. En revanche, le délai entre la présentation des extraits et la phase de test ne semble pas modifier l'effet de ces dimensions émotionnelles sur la mémoire. Ce résultat suggère que les émotions n'influenceraient pas la mémoire à plus long terme des extraits musicaux de manière spécifique. Toutefois, les performances des patients présentant une lésion du LTM gauche étaient déficitaires par rapport à celles des témoins quel que soit le délai alors que les performances des patients présentant une lésion du LTM droit étaient déficitaires uniquement après un délai long. Cela appuie l'idée que le LTM droit contribuerait tout particulièrement à la consolidation en mémoire à long terme des informations musicales. Enfin, il est important de noter qu'après un délai court, la mémoire musicale de ces patients semble être moins déficitaire que leur mémoire pour des stimuli verbaux ou visuels non émotionnels. Cet avantage de la mémoire musicale sur d'autres types de mémoire pourrait être lié aux particularités émotionnelles du matériel musical. En revanche, la supériorité de la mémoire musicale sur la mémoire non musicale s'estomperait avec le temps. A nouveau, il faut rester prudent quant à l'interprétation de ces résultats car ils restent à confirmer au vu du faible effectif de patients. En conclusion, le rehaussement émotionnel de la mémoire mis en évidence ici avec un matériel musical ouvre des perspectives prometteuses pour la prise en charge des troubles de la mémoire.

**Remerciements** : Les auteurs tiennent à remercier tous les participants qui ont accepté de prendre part à cette étude.

**Financement** : Cet article a été soutenu par le Conseil Régional des Hauts-de-France, et par l'Université de Lille pour Clémence Nineuil et l'Institut Universitaire de France pour Séverine Samson.

## References

- Adolphs, R. (2000). Impaired Emotional Declarative Memory Following Unilateral Amygdala Damage. *Learning & Memory*, 7(3), 180–186. <https://doi.org/10.1101/lm.7.3.180>
- Åhs, F., Kumlien, E., & Fredrikson, M. (2010). Arousal enhanced memory retention is eliminated following temporal lobe resection. *Brain and Cognition*, 73(3), 176–179. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.04.009>
- Alonso, I., Dellacherie, D., & Samson, S. (2015). Emotional memory for musical excerpts in young and older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2015.00023>
- Altenmüller, E. O., Siggel, S., Mohammadi, B., Samii, A., & Münte, T. F. (2014). Play it again sam: Brain correlates of emotional music recognition. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00114>
- Anderson, A. K., Christoff, K., Stappen, I., Panitz, D., Ghahremani, D. G., Glover, G., Gabrieli, J. D. E., & Sobel, N. (2003). Dissociated neural representations of intensity and valence in human olfaction. *Nature Neuroscience*, 6(2), 196–202. <https://doi.org/10.1038/nn1001>
- Belfi, A. M., Karlan, B., & Tranel, D. (2016). Music evokes vivid autobiographical memories. *Memory*, 24(7), 979–989. <https://doi.org/10.1080/09658211.2015.1061012>
- Blood, A. J., & Zatorre, R. J. (2001). 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. <https://doi.org/10.1073/pnas.191355898>
- Bradley, M. M., Greenwald, M. K., Petry, M. C., & Lang, P. J. (1992). Remembering pictures: Pleasure and arousal in memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18(2), 379.
- Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 25(1), 49–59. [https://doi.org/10.1016/0005-7916\(94\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0005-7916(94)90063-9)
- Brearly, T. W., Shura, R. D., Martindale, S. L., Lazowski, R. A., Luxton, D. D., Shenal, B. V., & Rowland, J. A. (2017). Neuropsychological Test Administration by Videoconference: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Neuropsychology Review*, 27(2), 174–186. <https://doi.org/10.1007/s11065-017-9349-1>
- Buchanan, T. W., Denburg, N. L., Tranel, D., & Adolphs, R. (2001). Verbal and Nonverbal Emotional Memory Following Unilateral Amygdala Damage. *Learning & Memory*, 8(6), 326–335. <https://doi.org/10.1101/lm.40101>
- Cahill, L., & McGaugh, J. L. (1995). A novel demonstration of enhanced memory associated with emotional arousal. *Consciousness and Cognition*, 4(4), 410–421.

- Carvajal, F., Calahorra-Romillo, A., Rubio, S., & Martín, P. (2020). *Verbal emotional memory laterality effect on amygdalohippocampectomy for refractory epilepsy*. 7. <https://doi.org/10.1002/brb3.1872>
- Cohen, A. J. (2011). Music as a source of emotion in film. In P. N. Juslin & J. Sloboda (Eds.), *Handbook of Music and Emotion: Theory, Research, Applications* (pp. 249–272). Oxford University Press.
- Comblain, C., D'Argembeau, A., Van der Linden, M., & Aldenhoff, L. (2004). The effect of ageing on the recollection of emotional and neutral pictures. *Memory*, 12(6), 673–684. <https://doi.org/10.1080/09658210344000477>
- Craik, F. I. M., & Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 11(6), 671–684. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(72\)80001-X](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(72)80001-X)
- Dellacherie, D., Bigand, E., Molin, P., Baulac, M., & Samson, S. (2011). Multidimensional scaling of emotional responses to music in patients with temporal lobe resection. *Cortex*, 47(9), 1107–1115. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.05.007>
- Eerola, T., & Vuoskoski, J. K. (2011). A comparison of the discrete and dimensional models of emotion in music. *Psychology of Music*, 39(1), 18–49. <https://doi.org/10.1177/0305735610362821>
- Ehrlé, N. (1998). *Traitement temporel de l'information auditive et lobe temporal (Temporal processing of auditory information in mediotemporal lobe)* [Dissertation/Ph.D. thesis.]. Université de Reims.
- Ellis, B. W., Johns, M. W., Lancaster, R., Raptopoulos, P., Angelopoulos, N., & Priest, R. G. (1981). The St. Mary's Hospital Sleep Questionnaire: A Study of Reliability. *Sleep*, 4(1), 93–97. <https://doi.org/10.1093/sleep/4.1.93>
- Eschrich, S., Münte, T. F., & Altenmüller, E. O. (2005). Remember Bach: An Investigation in Episodic Memory for Music. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060(1), 438–442. <https://doi.org/10.1196/annals.1360.045>
- Eschrich, S., Münte, T. F., & Altenmüller, E. O. (2008). Unforgettable film music: The role of emotion in episodic long-term memory for music. *BMC Neuroscience*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/1471-2202-9-48>
- Ferreri, L., & Rodriguez-Fornells, A. (2017). Music-related reward responses predict episodic memory performance. *Experimental Brain Research*, 235(12), 3721–3731. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5095-0>
- Ferreri, L., & Rodriguez-Fornells, A. (2022). Memory modulations through musical pleasure. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1516(1), 5–10. <https://doi.org/10.1111/nyas.14867>
- Frank, J. E., & Tomaz, C. (2003). Lateralized impairment of the emotional enhancement of verbal memory in patients with amygdala–hippocampus lesion. *Brain and Cognition*, 52(2), 223–230. [https://doi.org/10.1016/S0278-2626\(03\)00075-7](https://doi.org/10.1016/S0278-2626(03)00075-7)

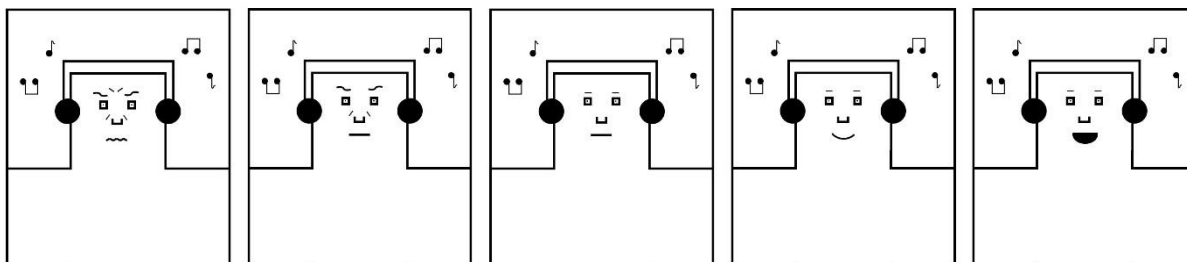
- Fuentes-Sánchez, N., Pastor, R., Escrig, M. A., Elipe-Miravet, M., & Pastor, M. C. (2021). Emotion elicitation during music listening: Subjective self-reports, facial expression, and autonomic reactivity. *Psychophysiology*, 58(9), e13884. <https://doi.org/10.1111/psyp.13884>
- Gold, B. P., Mas-Herrero, E., Zeighami, Y., Benovoy, M., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2019). Musical reward prediction errors engage the nucleus accumbens and motivate learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(8), 3310–3315. <https://doi.org/10.1073/pnas.1809855116>
- Gomes, C. F. A., Brainerd, C. J., & Stein, L. M. (2013). Effects of emotional valence and arousal on recollective and nonrecollective recall. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 39(3), 663–677. <https://doi.org/10.1037/a0028578>
- Gosselin, N., Peretz, I., Johnsen, E., & Adolphs, R. (2007). Amygdala damage impairs emotion recognition from music. *Neuropsychologia*, 45(2), 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.07.012>
- Gosselin, N., Peretz, I., Noulhiane, M., Hasboun, D., Beckett, D., Baulac, M., & Samson, S. (2005). Impaired recognition of scary music following unilateral temporal lobe excision. *Brain*, 128(3), 628–640. <https://doi.org/10.1093/brain/awh420>
- Groussard, M., Chan, T. G., Coppalle, R., & Platel, H. (2019). Preservation of Musical Memory Throughout the Progression of Alzheimer's Disease? Toward a Reconciliation of Theoretical, Clinical, and Neuroimaging Evidence. *Journal of Alzheimer's Disease*, 68(3), 857–883. <https://doi.org/10.3233/JAD-180474>
- Halpern, A. R., & Müllensiefen, D. (2008). Effects of timbre and tempo change on memory for music. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(9), 1371–1384. <https://doi.org/10.1080/17470210701508038>
- Hamann, S. B. (2001). Cognitive and neural mechanisms of emotional memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(9), 394–400. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01707-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01707-1)
- Jones-Gotman, M., Zatorre, R. J., Olivier, A., Andermann, F., Cendes, F., Staunton, H., McMackin, D., Siegel, A. M., & Wieser, H. G. (1997). Learning and retention of words and designs following excision from medial or lateral temporal-lobe structures. *Neuropsychologia*, 35(7), 963–973. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(97\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(97)00024-9)
- Juslin, P. N. (2013). What does music express? Basic emotions and beyond. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2013.00596>
- Kensinger, E. A. (2004). Remembering Emotional Experiences: The Contribution of Valence and Arousal. *Reviews in the Neurosciences*, 15(4). <https://doi.org/10.1515/REVNEURO.2004.15.4.241>
- Kensinger, E. A. (2007). Negative Emotion Enhances Memory Accuracy: Behavioral and Neuroimaging Evidence. *Current Directions in Psychological Science*, 16(4), 213–218. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2007.00506.x>

- Kensinger, E. A. (2008). Age Differences in Memory for Arousing and Nonarousing Emotional Words. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 63(1), P13–P18. <https://doi.org/10.1093/geronb/63.1.P13>
- Kensinger, E. A., & Corkin, S. (2004). Two routes to emotional memory: Distinct neural processes for valence and arousal. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(9), 3310–3315.
- LaBar, K. S., & Cabeza, R. (2006). Cognitive neuroscience of emotional memory. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(1), 54–64. <https://doi.org/10.1038/nrn1825>
- LaBar, K. S., & Phelps, E. A. (1998). Arousal-Mediated Memory Consolidation: Role of the Medial Temporal Lobe in Humans. *Psychological Science*, 9(6), 490–493. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00090>
- Li, X., Li, X., Chen, S., Zhu, J., Wang, H., Tian, Y., & Yu, Y. (2018). Effect of emotional enhancement of memory on recollection process in young adults: The influence factors and neural mechanisms. *Brain Imaging and Behavior*, 14, 119–129. <https://doi.org/10.1007/s11682-018-9975-0>
- Majdan, A., Sziklas, V., & Jones-Gotman, M. (1996). Performance of healthy subjects and patients with resection from the anterior temporal lobe on matched tests of verbal and visuo-perceptual learning. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 18(3), 416–430.
- Mas-Herrero, E., Marco-Pallares, J., Lorenzo-Seva, U., Zatorre, R. J., & Rodriguez-Fornells, A. (2013). Individual Differences in Music Reward Experiences. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 31(2), 118–138. <https://doi.org/10.1525/mp.2013.31.2.118>
- McGaugh, J. L. (2018). Emotional arousal regulation of memory consolidation. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 19, 55–60. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.10.003>
- Mickley Steinmetz, K. R., & Kensinger, E. A. (2009). The effects of valence and arousal on the neural activity leading to subsequent memory. *Psychophysiology*, 46(6), 1190–1199. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2009.00868.x>
- Montagrin, A., Brosch, T., & Sander, D. (2013). Goal conduciveness as a key determinant of memory facilitation. *Emotion*, 13(4), 622–628. <https://doi.org/10.1037/a0033066>
- Murty, V. P., Ritchey, M., Adcock, R. A., & LaBar, K. S. (2010). fMRI studies of successful emotional memory encoding: A quantitative meta-analysis. *Neuropsychologia*, 48(12), 3459–3469. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.07.030>
- Nineuil, C., Dellacherie, D., & Samson, S. (2020). The Impact of Emotion on Musical Long-Term Memory. *Frontiers in Psychology*, 11, 2110. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.02110>
- Nineuil, C., Dellacherie, D., & Samson, S. (2022). French adaptation of a film music stimulus set: Normative emotional ratings of valence and arousal prompted by music excerpts. *Psychology of Music*, 50(5), 1707–1715. <https://doi.org/10.1177/03057356211050683>

- Ochsner, K. N. (2000). Are affective events richly recollected or simply familiar? The experience and process of recognizing feelings past. *Journal of Experimental Psychology: General*, 129(2), 242–261. <https://doi.org/10.1037//0096-3445.129.2.242>
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113.
- Peretz, I., Champod, A. S., & Hyde, K. (2003). Varieties of Musical Disorders. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999(1), 58–75. <https://doi.org/10.1196/annals.1284.006>
- Phelps, E. A. (2004). Human emotion and memory: Interactions of the amygdala and hippocampal complex. *Current Opinion in Neurobiology*, 14(2), 198–202. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2004.03.015>
- Phelps, E. A., LaBar, K. S., & Spencer, D. D. (1997). Memory for Emotional Words Following Unilateral Temporal Lobectomy. *Brain and Cognition*, 35(1), 85–109. <https://doi.org/10.1006/brcg.1997.0929>
- Pool, E., Brosch, T., Delplanque, S., & Sander, D. (2016). Attentional bias for positive emotional stimuli: A meta-analytic investigation. *Psychological Bulletin*, 142(1), 79–106. <https://doi.org/10.1037/bul0000026>
- Pouliot, S., & Jones-Gotman, M. (2008). Medial temporal-lobe damage and memory for emotionally arousing odors. *Neuropsychologia*, 46(4), 1124–1134. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.10.017>
- Ripollés, P., Ferreri, L., Mas-Herrero, E., Alicart, H., Gómez-Andrés, A., Marco-Pallares, J., Antonijoan, R. M., Noesselt, T., Valle, M., Riba, J., & Rodríguez-Fornells, A. (2018). Intrinsically regulated learning is modulated by synaptic dopamine signaling. *ELife*, 7, e38113. <https://doi.org/10.7554/eLife.38113>
- Ripollés, P., Marco-Pallarés, J., Alicart, H., Tempelmann, C., Rodríguez-Fornells, A., & Noesselt, T. (2016). Intrinsic monitoring of learning success facilitates memory encoding via the activation of the SN/VTA-Hippocampal loop. *ELife*, 5, e17441. <https://doi.org/10.7554/eLife.17441>
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39(6), 1161.
- Salimpoor, V. N., Benovoy, M., Larcher, K., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2011). Anatomically distinct dopamine release during anticipation and experience of peak emotion to music. *Nature Neuroscience*, 14(2), 257–262. <https://doi.org/10.1038/nn.2726>
- Salimpoor, V. N., van den Bosch, I., Kovacevic, N., McIntosh, A. R., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2013). Interactions Between the Nucleus Accumbens and Auditory Cortices Predict Music Reward Value. *Science*, 340(6129), 216–219. <https://doi.org/10.1126/science.1231059>
- Samson, S. (1999). Musical Function and Temporal Lobe Structures: A review of Brain Lesion Studies. *Journal of New Music Research*, 28(3), 217–228. <https://doi.org/10.1076/jnmr.28.3.217.3107>
- Samson, S., Dellacherie, D., & Platel, H. (2009). Emotional Power of Music in Patients with Memory Disorders: Clinical Implications of Cognitive Neuroscience. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169(1), 245–255. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04555.x>

- Samson, S., & Zatorre, R. J. (1992). Learning and retention of melodic and verbal information after unilateral temporal lobectomy. *Neuropsychologia*, 30(9), 815–826. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(92\)90085-Z](https://doi.org/10.1016/0028-3932(92)90085-Z)
- Schmidt, M. (1996). *Rey auditory verbal learning test: A handbook* (Vol. 17). Western Psychological Services Los Angeles, CA.
- Spielberger, C. D. (1983). *State-trait anxiety inventory for adults*.
- Stickgold, R., & Walker, M. P. (2007). Sleep-dependent memory consolidation and reconsolidation. *Sleep Medicine*, 8(4), 331–343. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2007.03.011>
- Wagner, U., Hallschmid, M., Rasch, B., & Born, J. (2006). Brief Sleep After Learning Keeps Emotional Memories Alive for Years. *Biological Psychiatry*, 60(7), 788–790. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2006.03.061>
- Waring, J. D., & Kensinger, E. A. (2009). Effects of emotional valence and arousal upon memory trade-offs with aging. *Psychology and Aging*, 24(2), 412–422. <https://doi.org/10.1037/a0015526>
- Waring, J. D., & Kensinger, E. A. (2011). How emotion leads to selective memory: Neuroimaging evidence. *Neuropsychologia*, 49(7), 1831–1842. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.03.007>
- Watanabe, T., Yagishita, S., & Kikyo, H. (2008). Memory of music: Roles of right hippocampus and left inferior frontal gyrus. *NeuroImage*, 39(1), 483–491. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.08.024>
- Watson, D., Clark, L. A., & Carey, G. (1988). *Positive and Negative Affectivity and Their Relation to Anxiety and Depressive Disorders*. 8.
- Wechsler, D. (2014). *Wechsler adult intelligence scale–Fourth* (Edition (WAIS–IV)). Psychological Corporation.
- Yonelinas, A. P. (1994). Receiver-Operating Characteristics in Recognition Memory: Evidence for a Dual-Process Model. *Journal of Experimental Psychology*, 20(6), 1341–1354.
- Yonelinas, A. P., & Ritchey, M. (2015). The slow forgetting of emotional episodic memories: An emotional binding account. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(5), 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.02.009>

## Matériels supplémentaires



**Figure 7.** Échelle de plaisir musical en cinq points

La **Table 6** présente les données neuropsychologiques additionnelles des patients : les notes standards et les performances au subtest mémoire des chiffres de la *Wechsler Adult Intelligence Scale* (WAIS-IV, Wechsler, 2014) ainsi que les performances obtenues aux tests de mémoire verbale (*Rey Auditory Verbal Learning test* ; Schmidt, 1996 ; *Abstract words Learning test* ; Jones-Gotman, 1997) et de mémoire visuelle (*Aggie Figures Learning Test* ; Majdan et al., 1996). Les performances des patients ont été comparées à celle d'un groupe contrôle.

**Table 6.**

Score aux tests neuropsychologiques de mémoire des patients présentant une lésion du LTM gauche ou droit par rapport à une population de participants contrôles

|                                                      | Patients<br>LTM gauche (a)<br>N=17 | Patients<br>LTM droit (b)<br>N=13 | Participants<br>contrôles (c)<br>N=125 | p‡     |
|------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|--------|
| <b>Mémoire des chiffres</b>                          |                                    |                                   |                                        |        |
| Note standard                                        | 10.3 [8.0, 13.0]                   | 10.6 [9.0, 12.0]                  | -                                      | .933   |
| Empan verbal                                         | 6.3 [5.0, 7.0]                     | 6.1 [6.0, 6.0]                    | -                                      | .663   |
| <b>AWLT (max 13)</b>                                 |                                    |                                   |                                        |        |
| Moyenne des 4 rappels                                | 6.6 [4.7, 8.5] c                   | 9.4 [8.2, 10.3]                   | 9.7 [8.5, 11.0] a                      | <.001* |
| Rappel différé (24 heures)                           | 3.5 [1.0, 5.0] b,c                 | 7.0 [5.0, 9.0] a                  | 8.8 [7.0, 11.0] a                      | <.001* |
| Reconnaissance                                       | 12.0 [10.0, 13.0] b,c              | 13.0 [12.0, 13.0] a               | 13.0 [12.0, 13.0] a                    | <.001* |
| <b>RAVLT (max 15)</b><br><i>2 données manquantes</i> |                                    |                                   |                                        |        |
| Moyenne des 5 rappels                                | 9.3 [8.5, 10.5] b,c                | 14.5 [11.0, 13.6] a               | 12.1 [11.2, 13.2] a                    | <.001* |
| Rappel différé (15 minutes)                          | 8.3 [5.5, 11.5] b,c                | 12.9 [11.0, 15.0] a               | 13.5 [12, 15.0] a                      | <.001* |
| Reconnaissance                                       | 12.0 [10.0, 15.0] b,c              | 14.7 [15.0, 15.0] a               | 14.6 [14.0, 15.0] a                    | <.001* |
| <b>AFLT (max 15)</b><br><i>1 donnée manquante</i>    |                                    |                                   |                                        |        |
| Moyenne des 5 rappels                                | 8.1 [6.6, 9.4] c                   | 8.7 [7.2, 9.8]                    | 10.1 [8.7, 11.9] a                     | .003*  |
| Rappel différé (15 minutes)                          | 10.5 [8.0, 13.0]                   | 11.1 [9.7, 14.0]                  | 12.4 [11.0, 14.0]                      | .068   |
| Reconnaissance                                       | 13.9 [14.0, 15]                    | 13.7 [13.0, 15.0]                 | 14.5 [14.8, 15]                        | .056   |

Notes. Les données reportées sont la médiane [premier quartile, troisième quartile].

‡ Des tests de Kruskal-Wallis ont été utilisés pour comparer les trois groupes.

Abréviations : AWLT = *Abstract words Learning Test* ; RAVLT = *Rey Auditory Verbal Learning test* ; AFLT = *Aggie Figures Learning Test*.



# ARTICLE IV: Revisiting emotion recognition in different types of temporal lobe epilepsy: the influence of facial expression intensity<sup>4</sup>

**Clémence Nineuil<sup>1</sup>, Marion Houot<sup>2,3,4</sup>, Delphine Dellacherie<sup>1,5</sup>, Marie Méré<sup>6</sup>, Marisa Denos<sup>7</sup>, Sophie Dupont<sup>6,8</sup> and Séverine Samson<sup>1,6,8</sup>**

8. Univ. Lille, ULR 4072 - PSITEC - Psychologie : Interactions Temps Émotions Cognition, F-59000 Lille, France
9. Centre of Excellence of Neurodegenerative Disease (CoEN), AP-HP, Pitié-Salpêtrière Hospital, Paris, France.
10. Institute of Memory and Alzheimer's Disease (IM2A), Department of Neurology, AP-HP, Pitié-Salpêtrière Hospital, Paris, France.
11. Clinical Investigation Centre, Institut du Cerveau et de la Moelle épinière (ICM), Pitié-Salpêtrière Hospital, Paris, France
12. CHU Lille, Centre de Référence Malformations et Maladies Congénitales du Cervelet, F-59000 Lille, France
13. Epilepsy Unit, AP-HP, Pitié-Salpêtrière Hospital, Paris, France
14. Rehabilitation Unit, AP-HP, Pitié-Salpêtrière Hospital, Paris, France
15. Centre de Recherche de l'Institut du Cerveau Et de La Moelle Épinière (ICM), UMPC-UMR 7225 CNRS-UMRS 975 Inserm, Paris, France

---

<sup>4</sup> Article sous révision

**Abstract:**

Temporal lobe epilepsy (TLE) can induce various difficulties in recognizing emotional facial expressions (EFE), particularly for negative valence emotions. However, these difficulties have not been systematically examined according to the localization of the epileptic focus. For this purpose, we used a forced-choice recognition task in which faces expressing fear, sadness, anger, disgust, surprise, or happiness were presented in different intensity levels from intermediate to full-blown. The first objective of our study was to evaluate the impact of emotional intensity on the recognition of EFE in TLE patients compared to control participants. The second objective was to assess the effect of localization of epileptic focus on the recognition of EFE in patients with medial temporal lobe epilepsy (MTLE) associated or not to hippocampal sclerosis (HS), or lateral temporal lobe epilepsy (LTLE). The results showed that the 272 TLE patients and the 68 control participants were not differently affected by the intensity of EFE whereas we highlighted group differences within the clinical population when we took into account the localization of the temporal lobe epileptic focus. As predicted, TLE patients were impaired in recognizing fear and disgust relative to controls. Moreover, the scores of these patients varied according to the localization of the epileptic focus, but not according to the cerebral lateralization of TLE. Facial expression of fear was less well recognized by MTLE patients, with or without HS, and expression of disgust was less well recognized by LTLE as well as MTLE without HS patients. Moreover, emotional intensity modulated differently the recognition of disgust and surprise of the three patient groups underlying the relevance of using intermediate emotional intensity to distinguish the effect of epileptic focus localization. These findings should be taken into account for interpreting the emotional behaviors and deserve to be further investigated before considering social cognition interventions in TLE patients.

**Keywords:** Medial temporal lobe epilepsy, Lateral temporal lobe epilepsy, Hippocampal sclerosis, Emotion recognition, Facial expression, Emotional intensity.

## 1. Introduction

Among drug-resistant epilepsies, temporal lobe epilepsy (TLE) is the most common in adults. Neuropsychological deficits associated with this condition mainly concern memory (for review, Allone *et al.*, 2017), mood (i.e., depression et anxiety, Kotwas *et al.*, 2017), but also social cognition (for review, Bora & Meletti, 2016; Giovagnoli *et al.*, 2013, 2021; Stewart *et al.*, 2019) with, in particular, difficulties in recognizing emotional facial expressions (EFE) (for review, Monti & Meletti, 2015), difficulties that appear to have a significant impact on the social life of the patients (Steiger & Jokeit, 2017).

The recognition of EFE is the ability to accurately identify the emotional expression of a face. It involves a brain network including temporal and frontal cortical areas but also some subcortical structures (i.e., striatum) and limbic regions (for review, Fusar-Poli *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2021). This network is frequently impaired in the presence of TLE and specifically medial temporal lobe epilepsy (MTLE) (Steiger *et al.*, 2017). Indeed, the amygdala, a limbic region located in the medial temporal lobe, is known to play a role in recognition of EFE (Adolphs, 2010; Habel *et al.*, 2007). Its involvement in fearful face recognition has been confirmed on multiple occasions in patients with unilateral or bilateral amygdala lesions (Adolphs *et al.*, 1994, 1995, 1999; Anderson & Phelps, 2000; Calder *et al.*, 1996; Meletti, Cantalupo, *et al.*, 2014).

In the domain of TLE, the majority of work has evaluated the recognition of EFE from a forced-choice recognition paradigm. This task consists of associating a facial expression with a verbal emotional label by choosing among different basic emotional categories (i.e., fear, anger, surprise, disgust, happiness, and sadness) as described by Ekman (1992). Thus, several studies have shown a deficit in the recognition of fear (Bonora *et al.*, 2011; Broicher *et al.*, 2012; Gomez-Ibañez *et al.*, 2014; Hennion *et al.*, 2015; Meletti, Benuzzi, Rubboli, *et al.*, 2003; Meletti *et al.*, 2009; Meletti, Picardi, *et al.*, 2014; Reynders *et al.*, 2005; Tanaka *et al.*, 2013), but also of disgust (Broicher *et al.*, 2012; Gomez-Ibañez *et al.*, 2014; Hennion *et al.*, 2015), sadness (Tanaka *et al.*, 2013) and anger (Bonora *et al.*, 2011; Meletti *et al.*, 2009) in the presence of a TLE. To our knowledge, no study has reported difficulties in recognizing facial expressions of happiness in TLE patients. All these data suggest the importance of the temporal lobe in the recognition of facial expressions with negative emotional valence (for review, Monti & Meletti, 2015).

Several studies (Meletti, Benuzzi, Nichelli, et al., 2003; Meletti, Benuzzi, Rubboli, et al., 2003; Meletti et al., 2009) have investigated the existence of cerebral asymmetry in the recognition of EFE by comparing performances of patients with either right or left TLE to control participants. Although performances were lower in the presence of a right TLE than in the presence of a left TLE (Meletti et al., 2009), performances of both groups of patients were overall deficient compared to those of control participants. In agreement with numerous data in the literature, this latter result demonstrates that regardless of the lateralization of the temporal lesion, patients with TLE have lower EFE recognition scores than control participants (Amlerova et al., 2014; Bonora et al., 2011; Gomez-Ibañez et al., 2014; Reynders et al., 2005; Tanaka et al., 2013; for review, Monti & Meletti, 2015). Taken together, these studies suggest a bilateral involvement of the temporal lobes in the recognition of EFE.

To clarify the involvement of different temporal lobe regions in the recognition of EFE, several studies have separately examined the performances of patients with MTLE with or without hippocampal sclerosis (HS), an etiology frequently encountered in TLE (Blümcke et al., 2013), to that of patients with lateral temporal lobe epilepsy (LTLE). In a forced-choice recognition task of emotional faces expressing emotions of happiness, fear, disgust, anger, or sadness, Meletti et al. (2009) showed that, except for happiness, all emotional categories were less well recognized by the MTLE patient group compared to the LTLE patient groups and the control group, with the latter two groups not differing from each other. However, Hennion et al. (2015) were not able to find a difference between MTLE and LTLE patients in performances for any emotion tested, although both patient groups were deficient compared to control participants. Furthermore, the study of Meletti et al. (2009), as well as the study of Tanaka et al. (2013) that used dynamic facial expressions (i.e., videotaped faces), showed that the presence or absence of HS in MTLE patients did not appear to affect EFE recognition performances. Divergent results were reported by Hennion et al. (2015) who found a difference in fear recognition between MTLE patients with a HS and MTLE patients without a brain lesion (and therefore without HS) only in the presence of a left temporal lesion but not in the presence of a right temporal lesion. As shown by these results, the contribution of the different regions of the temporal lobe in the recognition of EFE remains widely debated in the literature. Therefore, it seems necessary to investigate this issue further in a large number of TLE patients with different localization of epileptic focus.

To date, the influence of epilepsy-related clinical characteristics, such as age at onset of disease, number of anti-seizure medications (ASMs), or seizure frequency on EFE recognition abilities has not been clearly identified. A few studies have shown that difficulties in recognizing EFE are often associated with early onset of epilepsy (Bonora et al., 2011; Meletti, Benuzzi, Nichelli, et al., 2003; Meletti et al., 2009), and a high number of ASMs (Hlobil et al., 2008). However, these effects vary considerably across studies, as discussed in several literature reviews (for review, Edwards et al., 2017; Monti & Meletti, 2015).

So far, most studies have used stimuli expressing basic emotions at a full-blown intensity. However, manipulating the emotional intensity expressed by the faces makes it possible to vary the difficulty level of the task and thus improve its sensitivity. In control participants, increasing the intensity of EFE induces an improvement in EFE recognition performances (Hess et al., 1997; Wells et al., 2016). To our knowledge, only two studies have tested the influence of emotional intensity on the recognition of EFE in patients with TLE (Lin et al., 2022; Sedda et al., 2013). In the study of Sedda et al., (2013), faces expressing emotions of happiness, fear, disgust, anger, or sadness taken from Ekman & Friesen (1976) were presented at 4 different levels of intensity (i.e., 35%, 50%, 75%, and 100%). These different emotional intensities were obtained by using a morphing technique to transform a neutral facial expression into an emotional expression. The results of this study showed that when the intensity of the EFE was attenuated (i.e., 50% intensity), performances of the patients with right TLE was deficient compared to that of the control participants for the recognition of fear, sadness, and disgust, whereas it was no longer deficient when the intensity was maximal (i.e., 100% intensity). More recently, Lin et al. (2022) underlined the interest to use different emotional intensity levels using faces from the Taiwan Corpora of Chinese Emotions and Relevant Psychophysiological Data (Cheng et al., 2013) also expressing basic emotions (i.e., happiness, fear, disgust, anger, sadness). In this study conducted in patients with temporal lobe or frontal lobe epilepsy, three categories of emotional intensity (i.e., low, medium, or high) were used as well as neutral expressions. When emotional intensity was low or high, the recognition performances of patients and control participants did not differ. In contrast, when the emotional intensity was medium, patients showed a deficit in emotional recognition, especially for the emotion of fear. Again, performances of patients with TLE improved with increasing emotional intensity of faces. The results of the latter two studies highlight the relevance of modulating the emotional intensity expressed by the faces to clarify the nature of the difficulties in recognizing EFE encountered by these patients. The use of faces expressing

emotions only at a full-blown intensity appears to therefore lack sensitivity. Indeed, the presence of TLE appears to not cause a massive deficit in EFE recognition abilities, but a difficulty in recognizing EFE of moderate emotional intensity. Increasing the emotional intensity would therefore improve the discrimination abilities of TLE patients.

Given the results reported in the literature, the effect of a TLE on EFE recognition performances as a function of emotional intensity and localization of the epileptic focus remains to be clarified. For this purpose, different levels of emotional intensity of facial expression, from intermediate to full-blown intensity, were used. Thus, the first objective of our study is to evaluate the EFE recognition abilities of TLE patients compared to control participants. The second objective was to compare the EFE recognition abilities of patients according to the localization of their epileptic focus (i.e., MTLE with HS, MTLE without HS, LTLE) while controlling for the effects of demographic and clinical variables (i.e., sex, age, years of education, age at onset of epilepsy, seizure frequency and number of ASMs, lesion lateralization). We hypothesized that patients, regardless of epilepsy lateralization, would perform worse than control participants, especially for the emotion of fear, and most likely disgust, sadness, and anger, especially for the intermediate intensity EFEs. In addition, we expected patients with MTLE with or without HS to be more deficient in EFE recognition than patients with LTLE.

## 2. Methodology

### 2.1. Participants

Adult patients were recruited and evaluated over a 20-year period, from November 2000 to April 2020, through the Comprehensive Epilepsy Program at the Pitié-Salpêtrière Hospital (Paris) for possible epilepsy surgery. Only patients aged between 20 and 55 years, of French nationality, and presenting typical left-hemisphere lateralization of language were selected for this study. Localization and lateralization of unilateral TLE and characterization of focal seizures were achieved according to clinical history, ictal and interictal electroencephalographic (video-EEG) recordings, magnetic resonance imaging (MRI) findings, and other neuroimaging investigations (e.g., PET, SPECT, fMRI, SEEG), when necessary, as well as clinical neuropsychological evaluation. The patients were divided into three groups according to their epileptic focus: lateral temporal lobe epilepsy (LTLE), medial temporal lobe epilepsy with no hippocampal sclerosis (MTLE-noHS) (i.e., no lesion, dysplasia, tumor,

cavernoma, cyst), and medial temporal lobe epilepsy with hippocampal sclerosis (MTLE-HS). Right-handed French healthy control participants (HC), with no history of neurological or psychiatric illness, were also involved in this study. This study was conducted following the Declaration of Helsinki principles and in accordance with French ethical legislation and authorized by CNIL committee (No. 2146842).

## 2.2. Material

The stimuli, previously created by Granato and his colleagues (Bruyer & Granato, 1999; Granato & Bruyer, 2002) and used with permission, were taken from the Pictures of Facial Affect (Ekman and Friesen, 1975). Linear morphs were created from a neutral facial expression and each of the six prototypical emotions: happiness, sadness, fear, anger, disgust, and surprise. Thus, 17 morphs were generated for each emotion progressing from the neutral face to the prototypical facial expression of the six emotions, always expressed by the same woman's face. For this study, only the last 10 morphs, from intermediate intensity (50%) to full-blown intensity (100%), were presented to each participant, for a total of 60 black-and-white pictures of morphed faces (i.e., 10 different levels of intensity for each facial expression emotion), as used in a previous study (Gosselin et al., 2011).

## 2.3. Procedure

The 60 pictures of morphed faces were presented to each participant one by one with a list of six verbal emotion labels (i.e., anger, disgust, fear, happiness, sadness, surprise) visually displayed in front of the participants. Participants were asked to choose the label that best described the stimuli in a forced-choice task (regardless of its intensity) with no time limit. No feedback about the accuracy of the response was given. The fixed order of presentation of the morphed faces was pseudo-randomized.

## 2.4. Statistical analyses

### 2.4.1. Comparisons between HC participants and TLE patients

To compare demographical characteristics between the two groups (HC participants and TLE patients), Wilcoxon-Mann-Whitney tests were performed for numerical variables and Fisher's exact test for categorical variables.

To model the correct emotional recognition of each picture of a morphed face, a generalized mixed model (GLMM) was carried out. Observations corresponded to each

participant's correct recognition (as TRUE/FALSE) of the 60 pictures, which differed by type of emotion and level of emotional intensity. Fixed effects included Age, Sex, Years of education, Group, Type of emotion, Emotional intensity, and Presentation order. The Group x Type of emotion x Emotional intensity x Presentation order interaction was added onto the GLMM as well as all the lower-order interactions that resulted from it.

#### 2.4.2. Comparisons between the three groups of patients with LTLE, MTLE-noHS, and MTLE-HS

To compare demographic and clinical characteristics between the three groups of TLE patients, the Kruskal-Wallis test was performed for numerical variables and Fisher's exact test for categorical variables. For pairwise comparison, Mann-Whitney-Wilcoxon tests for numerical variables and Fisher's exact tests for categorical variables, were performed, both with Benjamini-Hochberg correction.

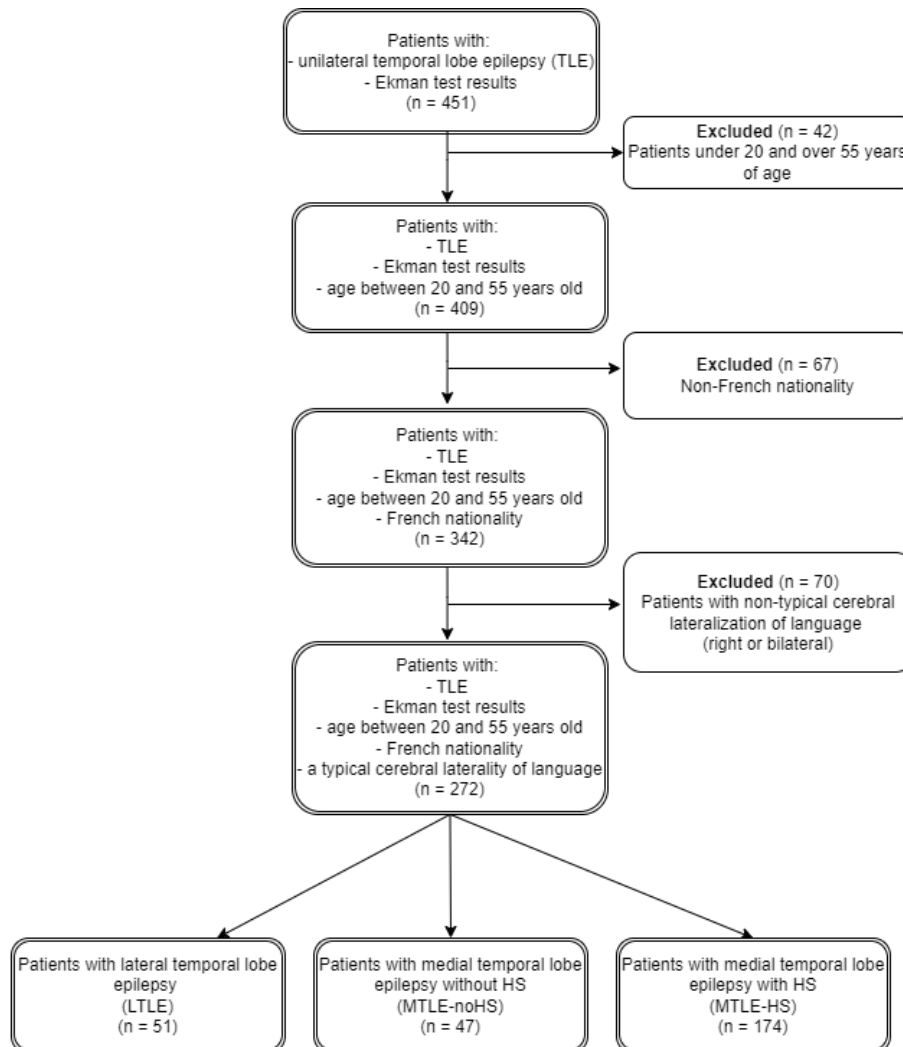
A GLMM was performed on the correct recognition on each picture of morphed face obtained by TLE patients to investigate the impact of clinical factors. Fixed effects were Age, Sex, Years of education, Side of epilepsy focus, Antiseizure medication (ASMs) number, Age at onset, Seizure frequency (i.e.,  $\geq 10$  or  $< 10$  seizures per month), TLE groups, Type of emotion, Emotional intensity, and Presentation order. The TLE groups x Type of emotion x Emotional intensity x Presentation order interaction was added onto the GLMM as well as all the lower-order interactions that resulted from it.

Both GLMMs were fitted with binomial distribution and logit link using maximum likelihood (Laplace Approximation) from the function `glmer` in the `lme4` package (v1.1-23). A random intercept on the patient code number was added to the GLMMs. Type II Wald chi-square tests were used to test main effects and interactions. Post hoc pairwise comparisons were carried out when appropriate with the `emmeans` package (v1.5.0) allowing the specification of custom contrasts to further determine where differences occurred. P-values resulting from the post hoc tests were determined from the t-ratio (t) with Kenward-Roger's approximation for degrees of freedom (df), and after adjustment by the Benjamini-Hochberg correction to account for the multiplicity of contrasts. Mean difference estimates are given on the logit scale. GLMM results were verified and confirmed after excluding outliers with a Cook's distance superior to 1.

Statistical analyses were achieved using R 3.6.1. (R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL ["https://www.R-project.org"](https://www.R-project.org).)

### 3. Results

Data from 451 patients with drug-resistant unilateral TLE on Ekman test were collected. After the exclusion of patients younger than 20 years or older than 55 years (n=42), non-French nationality (n=67), or with atypical cerebral lateralization of language (n=70), 272 patients were selected for the study (see **Figure 8**). Among these patients, 174 (64.0%) had MTLE-HS, 47 (17.3%) had MTLE-noHS and 51 (18.7%) had LTLE. Sixty-eight HC participants were recruited for this study.



**Figure 8.** Flow Chart of inclusion and exclusion criteria

### 3.1. Comparisons between groups of HC participants and TLE patients

#### 3.1.1. Sample description

Demographical comparisons between HC participants and TLE patients were presented in **Table 7**. No group difference was found in terms of age, sex ratio, and years of education. The median age of the sample was 37.2, 53.5% were women and the median years of education was 12.

**Table 7.**

Demographical and clinical data and comparisons between the two groups of participants (patients with unilateral temporal lobe epilepsy and healthy control participants).

|                      | HC participants<br>N=68 | TLE patients<br>N=272 | p <sup>‡</sup> |
|----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|
| Age, years           | 36.00 [28.00, 44.20]    | 37.50 [28.70, 44.60]  | .80            |
| Sex (Female)         | 39 (57.30%)             | 143 (52.60%)          | .50            |
| Years of education   | 12.00 [11.00, 14.00]    | 12.00 [10.00, 14.20]  | .23            |
| Intelligent Quotient | Not available           | 90.00 [81.00, 99.00]  | -              |

Notes. Data are given as median [first quartile, third quartile] for continuous variables and as count (percentages) for categorical variables.

<sup>‡</sup> Wilcoxon-Mann-Whitney test was used to compare groups for numerical variables and Fisher's exact test for categorical variables.

#### 3.1.2. Correct recognition model

The results of the GLMM are presented in **Table 9** (see in Supplementay Materials). Main effects of Sex (Wald  $\chi^2$  statistic (degrees of freedom): WT (1) = 7.7;  $p = .006$ ) and Years of education (WT (1) = 13.2;  $p < .001$ ) were founded with higher recognition in women compared to men and higher recognition in participants with higher levels of education. No effect of age was found (WT (1) = 0.24;  $p = .624$ ). The highest level of significant interactions was the interaction between Group and Presentation order (WT (1) = 8.7;  $p = .003$ , **Figure 9.A.**), the interaction between Group, Type of emotion, and Emotional intensity (WT (5) = 13.1;  $p = .022$ , **Figure 9.C.**) and Type of emotion, Emotional intensity and Presentation order (WT (5) = 20.1;  $p = .001$ , **Figure 9.D.**).

### 3.1.3. Interaction between Group and Presentation order

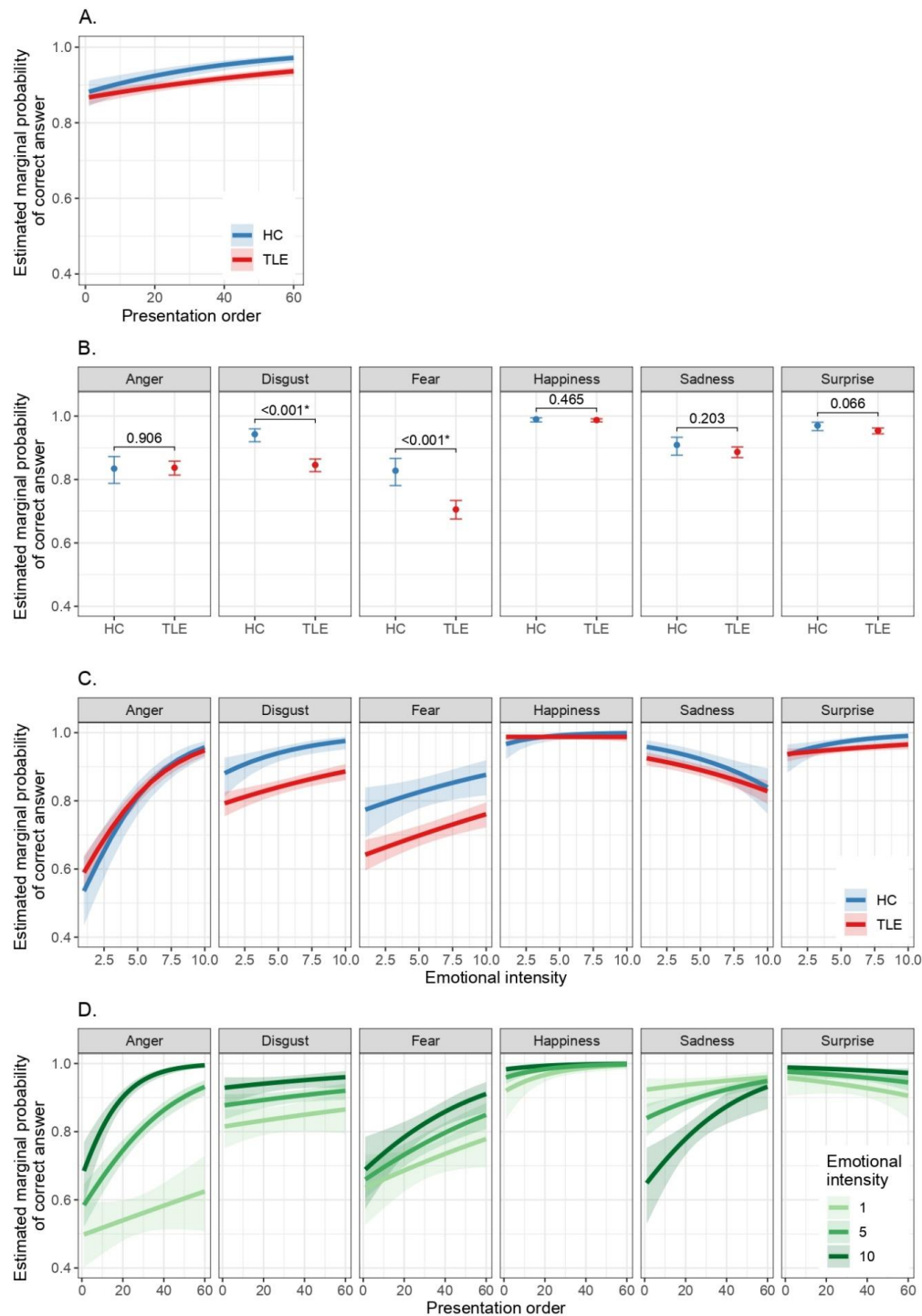
For all participants, recognition improved over the course of the task, but the improvement was slower in TLE patients than in HC participants (Mean difference estimate (MDE)  $\pm$  standard error (SE):  $-0.012 \pm 0.004$ ,  $p < .001$ , **Figure 9.A.**).

### 3.1.4. Interaction between Group, Type of emotion, and Emotional intensity

This interaction suggests that the impact of Emotional intensity between groups differed according to the Type of emotion (**Figure 9.C.**). For HC participants, recognition performances improved with the increase of Emotional intensity for all emotions (all slopes  $p < .027$ ), except for the recognition of sadness which decreased ( $p < .001$ ). For TLE patients, recognition performances improved with the increase of Emotional intensity for all emotions (all slopes  $p < .024$ ), except for the recognition of sadness which decreased ( $p < .001$ ), and for the recognition of happiness, which did not improve with Emotional intensity. Furthermore, whatever the Emotional intensity, the TLE patients were impaired in recognizing fear and disgust faces as compared to HC participants (MDE $\pm$ SE:  $-0.70 \pm 0.17$ ,  $p < 0.001$ , and  $-1.10 \pm 0.20$ ,  $p < 0.001$ , respectively, **Figure 9.B.**). Inspection of TLE patients' confusion matrix showed that fear was most confused with surprise (23.9%), and disgust was most confused with anger (16.4%) (**Table 11** see in Supplementay Materials). Moreover, the six emotions had different levels of difficulty in the two groups. In TLE patients, the most difficult emotion to recognize was fear, followed by anger and disgust (at the same level of difficulty), themselves followed by sadness, by surprise, and lastly by happiness. In HC participants, the most difficult emotions to recognize were fear and anger (at the same level of difficulty), followed by sadness, disgust, surprise, and lastly happiness.

### 3.1.5. Interaction between Type of emotion, Emotional intensity, and Presentation order

The interaction between Presentation order and Emotional intensity was only significant for anger (slope estimate  $\pm$  SE:  $0.007 \pm 0.001$ ,  $p < .001$ , **Figure 9.D.**) but not for the other emotions. For anger, recognition performances improved over the course of the task and even more so with the increase of Emotional intensity. Moreover, whatever the level of Emotional intensity, overall recognition performances increased over successive trials for all emotions, except for surprise which decreased (all slopes  $p < .008$ ).



**Figure 9.** Estimated marginal probability of correct answer between HC participants and TLE patients by (A) presentation order, (B) type of emotion, (C) type of emotion and emotional intensity, or (D) type of emotion, emotional intensity and presentation order.

Notes. Estimated marginal probability was extracted from the GLMM by applying the inverse logit transformation on the estimated marginal means.

For presentation purpose of the triple interaction Type of emotion, Emotional intensity, and Presentation order, in Figure 9.D., impact of presentation order on correct answer according to Type of emotion were calculated at values 1, 5 and 10 of Emotional intensity.

### 3.2. Comparisons between the three groups of patients (i.e., LTLE, MTLE-noHS, and MTLE-HS)

#### 3.2.1. Sample description

Demographical and clinical comparisons of TLE groups are presented in **Table 8**. LTLE group were younger than those in both MTLE-noHS ( $p < .001$ ) and MTLE-HS ( $p < .001$ ). They were fewer women in LTLE group than in MTLE-HS group ( $p = .001$ ). MTLE-HS group had fewer years of education and a longer disease duration compared to both LTLE and MTLE-noHS groups. MTLE-HS group also took more ASMs than MTLE-noHS group, but the number of ASMs taken by the LTLE group did not differ with the MTLE-HS and MTLE-noHS groups.

**Table 8.**

Demographical and clinical data and comparisons between the three TLE groups of patients (LTLE, MTLE-noHS, MTLE-HS).

|                                | LTLE (a)<br>N=51 (18.75%) | MTLE-noHS (b)<br>N=47 (17.28%) | MTLE-HS (c)<br>N=174 (63.97%) | $p^{\dagger}$ |
|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------|
| Age, years                     | 30.00 [24.00, 38.00] b, c | 36.60 [28.75, 42.70] a         | 39.65 [30.40, 47.10] a        | <.001*        |
| Sex (Female)                   | 15 (29.41%) c             | 23 (48.94%)                    | 105 (60.34%) a                | .001*         |
| Years of education             | 14.00 [11.00, 14.50] c    | 14.00 [11.50, 16.00] c         | 12.00 [9.00, 14.00] a, b      | <.001*        |
| Intelligent Quotient           | 92.00 [86.0, 103.00] c    | 96.00 [85.50, 106.00] c        | 87.00 [80.00, 97.00] a, b     | <.001*        |
| Aetiology                      |                           |                                |                               | <.001*        |
| CAVetKYs                       | 5 (9.80%) b, c            | 16 (34.04%) a, c               | -                             |               |
| DNETGTB                        | 17 (33.33%)               | 19 (40.43%)                    | -                             |               |
| Dysplasia                      | 7 (13.73%)                | 4 (8.51%)                      | -                             |               |
| No lesion                      | 14 (27.45%)               | 8 (17.02%)                     | -                             |               |
| Others                         | 8 (15.69%)                | 0 (0.00%)                      | -                             |               |
| Hippocampal sclerosis          | -                         | -                              | 174 (100.00%)                 |               |
| Side of epilepsy focus (right) | 28 (54.90%)               | 25 (53.19%)                    | 74 (42.53%)                   | .178          |

|                               |                           |                           |                           |        |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------|
| ASMs number                   | 2.00 [2.00, 3.00]         | 2.00 [2.00, 3.00] c       | 3.00 [2.00, 3.00] b       | .011*  |
| Age at onset                  | 15.40 [11.05, 19.35] b, c | 19.10 [13.00, 28.60] a, c | 11.05 [7.00, 18.00] a, b  | <.001* |
| Disease duration, years       | 15.30 [7.95, 19.85] c     | 12.30 [7.95, 22.00] c     | 23.45 [15.60, 33.62] a, b | <.001* |
| Seizure frequency (≥10/month) | 30 (58.82%)               | 36 (76.60%)               | 104 (60.47%)              | .109   |

Notes. Data are given as median [first quartile, third quartile] for continuous variables and as count (percentages) for categorical variables

‡ Kruskal-Wallis test was used to compare groups for numerical variables and Fisher's exact test for categorical variables. Pairwise Mann-Whitney-Wilcoxon tests for numerical variables and pairwise Fisher's exact tests for categorical variables, both with Benjamini-Hochberg correction were performed for pairwise comparison.

Abbreviations: LTLE = Lateral Temporal Lobe Epilepsy; MTLE = Medial Temporal Lobe Epilepsy; HS = Hippocampal Sclerosis; CAVetKYs = cavernoma and cyst; DNET = dysembryoplastic neuroepithelial tumor; ASMs = Antiseizure medications.

### 3.2.2. Correct recognition model

Results of the GLMM were presented in **Table 10**. As in the model with HC participants, main effects of Sex (WT (1) = 7.4;  $p = .007$ ) and Years of education (WT (1) = 8.6;  $p = .003$ ) were founded. We found a main effect of ASMs number (WT (1) = 4.9;  $p = .026$ ) with lower recognition in patients taking more ASMs. No effect of Age (WT (1) = 0.63;  $p = .429$ ), Side of epilepsy focus (WT (1) = 0.06;  $p = .805$ ), Age at onset (WT (1) = 0.6;  $p = .440$ ) and Seizure frequency (WT (1) = 0.59;  $p = .444$ ) was also found. The highest level of significant interactions were the interactions between TLE groups, Type of emotion, and Emotional intensity (WT (10) = 20.3;  $p = .027$ , **Figure 10.B.**) and between Type of emotion, Emotional intensity, and Presentation order (WT (5) = 17.5;  $p = .004$ , **Figure 10.C.**).

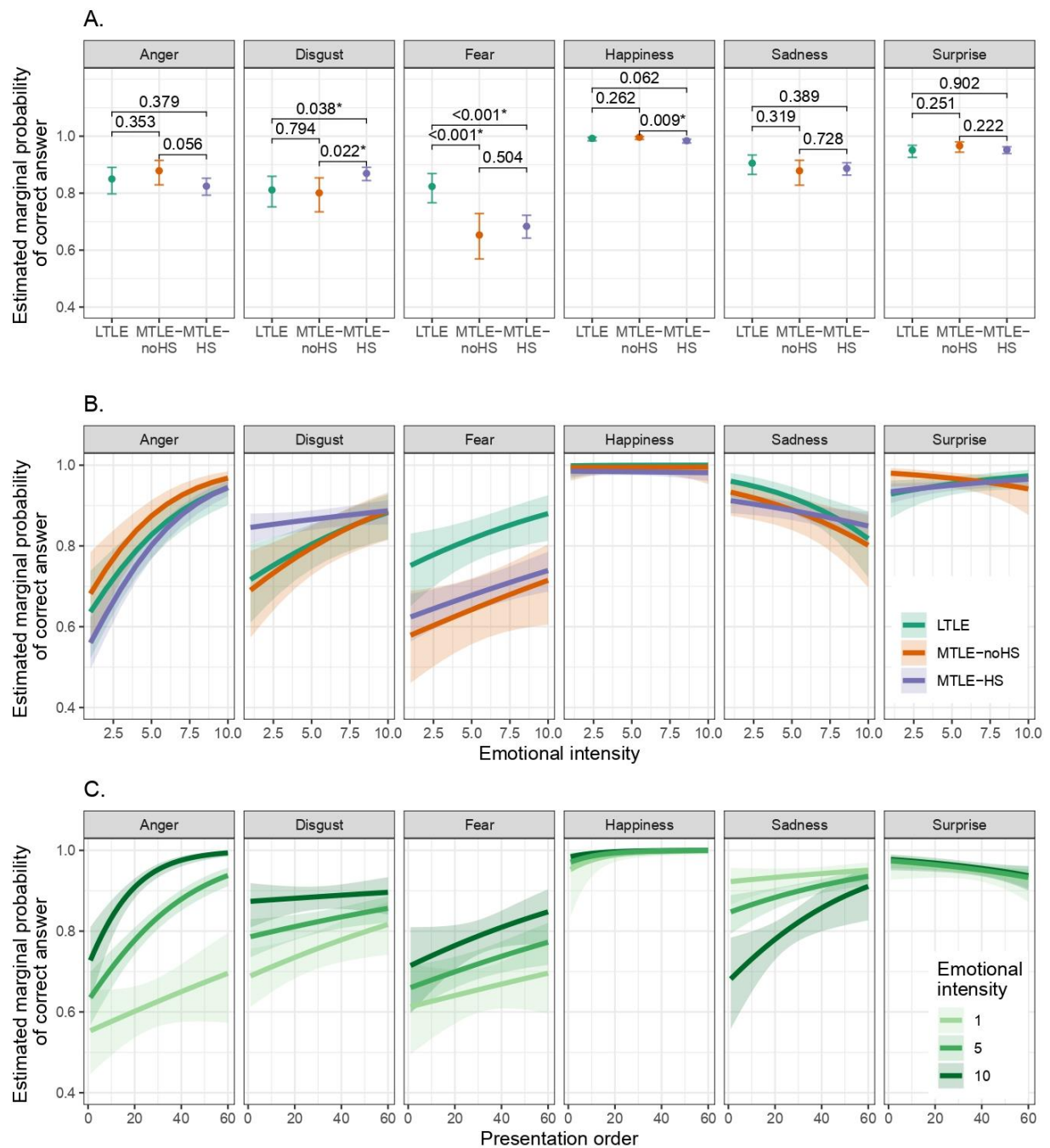
### 3.2.3. Interaction between TLE groups, Type of emotion, and Emotional intensity

The impact of Emotional intensity between the three TLE groups was different for disgust and surprise, but not for the other emotions. As depicted in **Figure 10.B.**, recognition performances for disgust at intermediate Emotional intensity were higher in MTLE-HS group than in the other groups, but this difference disappeared at full-blown Emotional intensity. The analysis showed that recognition performances of disgust improved less in MTLE-HS group than in MTLE-noHS group (MDE±SE:  $-0.10 \pm 0.05$ ,  $p = .047$ ); the same trend occurred compared to LTLE (MDE±SE:  $-0.08 \pm 0.05$ ,  $p = .084$ ). For surprise recognition, the recognition performances improved less in MTLE-noHS group than in MTLE-HS and LTLE groups

(MDE±SE: -0.20±0.09,  $p = .022$  and -0.24±0.10,  $p = .019$ , respectively). There was no differential impact of Emotional intensity for the other emotions (i.e., fear, anger, happiness, and sadness). However, whatever the level of Emotional intensity, there were group differences in recognition performances for fear, happiness, and disgust, but not for anger, surprise, and sadness (**Figure 10.A.**). MTLE-HS and MTLE-noHS groups were impaired in fear recognition compared to LTLE group (MDE±SE: -0.77±0.21,  $p < .001$ , and -0.91±0.25,  $p < .001$ , respectively). MTLE-HS group was impaired in happiness recognition compared to MTLE-noHS group (MDE±SE: -1.45±0.56,  $p = .009$ ); the same trend occurred compared to LTLE (MDE±SE: -0.74±0.95,  $p = .062$ ). Disgust will not be discussed here, since recognition performances were driven by Emotional intensity, as detailed earlier. Moreover, the six emotions present different levels of difficulty between the groups. In LTLE group, the most difficult emotions to recognize was fear, disgust, and anger (same level of difficulty for all three), followed by sadness, then surprise, with happiness recognized the easiest. In MTLE-noHS group, the most difficult emotion to recognize was fear, followed by disgust, then sadness and anger (same level of difficulty for both), then surprise, with happiness recognized the easiest. In MTLE-HS group, the most difficult emotion to recognize was fear, followed by anger, then disgust and sadness (same level of difficulty for both), then surprise, with happiness once again recognized the easiest.

#### 3.2.4. Interaction between Type of emotion, Emotional intensity, and Presentation order

The interaction between Presentation order and Emotional intensity was significant for anger but not for the other emotions (slope estimate ± SE: 0.003±0.002,  $p < .001$ , **Figure 10.C.**). For anger, recognition performances improved over the course of the task and even more so with the increase of Emotional intensity. Moreover, whatever the level of Emotional intensity, overall recognition performances increased over successive trials for all emotions, except for surprise which decreased (all slopes  $p < .001$ ).



**Figure 10.** Estimated marginal probability of correct answer between the three TLE groups (i.e., LTLE, MTLE-noHS, and MTLE-HS) by (A) Type of emotion, (B) Type of emotion and Emotional intensity, or (C) Type of emotion, Emotional intensity and Presentation order.

Notes. Estimated marginal probability was extracted from the GLMM by applying the inverse logit transformation on the estimated marginal means.

For presentation purpose of the triple interaction Type of emotion, Emotional intensity, and Presentation order, in Figure 8.C., impact of presentation order on correct answer according to Type of emotion were calculated at values 1, 5 and 10 of Emotional intensity.

## 4. Discussion

The present study aimed to clarify the effect of a TLE on EFE recognition abilities. For this purpose, 272 consecutive TLE patients who were candidates for surgical treatment of epilepsy as well as 68 HC participants were evaluated with an EFE recognition test whose originality was to evaluate the effect of the emotional intensity expressed by the faces. This study also tested the effect of the localization of the epileptic focus on the recognition of EFE by distinguishing MTLE patients associated or not with HS and LTLE patients. As expected, the results of this study first showed that TLE patients showed a deficit in fear and disgust recognition compared to HC participants. Overall, the performances of all participants increased with the emotional intensity of the faces regardless of the emotion, except for sadness whose performances decreased with intensity for all participants. Although happiness was globally very well recognized by all participants, it did not increase neither with intensity in TLE patients, unlike HC participants. Analyses also showed that EFE recognition improved as the task progressed. However, this within-task learning was less pronounced in TLE patients than in HC participants. Analyses considering the lateralization and localization of the epileptic focus allowed us to nuance the results. In agreement with previous studies (Amlerova et al., 2014; Bonora et al., 2011; Gomez-Ibañez et al., 2014; Reynders et al., 2005; Tanaka et al., 2013), no differences according to the right or left lateralization of the epilepsy were observed, suggesting that EFE recognition abilities rely on bilaterally represented brain functions, in agreement with neuroimaging data (Adolphs, 2002; Fusar-Poli et al., 2009). However, differences according to the localization of the epileptic focus were highlighted for fear, disgust, and to some extent happiness. Thus, expressions of fear were less well recognized in the presence of MTLE-HS or MTLE-noHS than in the presence of LTLE, while expressions of happiness were relatively less well recognized in the presence of MTLE-HS than in the presence of MTLE-noHS. In contrast, expressions of disgust were less well recognized in the presence of an LTLE or MTLE-noHS than in the presence of an MTLE-HS. Finally, the recognition performances of disgust and surprise in the different groups of TLE patients were modulated by emotional intensity.

As expected, the results of the present study confirm that TLE patients have deficient fear face recognition performances compared to HC participants (Bonora et al., 2011; Broicher et al., 2012; Gomez-Ibañez et al., 2014; Hennion et al., 2015; Meletti et al., 2003, 2009; Reynders et al., 2005; Tanaka et al., 2013; for review Monti & Meletti, 2015). Specifically,

fear recognition performances of the MTLE groups, with or without HS, were lower than those of the LTLE group. The presence of MTLE appears to have a greater impact than the presence of LTLE on fear recognition, confirming the results previously reported by Meletti et al. (2009). This result is certainly attributable to dysfunction of the amygdala in the medial temporal lobe, a structure known for its role in fear recognition, but also in the recognition of high arousal stimuli (Adolphs et al., 1994, 1995; Anderson & Phelps, 2000; Calder et al., 1996; Dellacherie et al., 2011; Meletti, Cantalupo, et al., 2014). Furthermore, the originality of this study is that it manipulated the level of emotional intensity of the EFE. Previous studies had shown that the EFE recognition performances of TLE patients were lower than that of HC participants when emotional intensity was medium (i.e., 50%), but that this difference disappeared when emotional intensity was at its maximum (i.e., 100%) (Lin et al., 2022; Sedda et al., 2013). Using faces expressing facial expressions of emotional intensity from intermediate intensity (50%) to full-blown intensity (100%), we did not replicate these results, as the deficits of TLE patients do not affect only the emotional expressions of intermediate intensity. Indeed, regardless of the localization of the epileptic focus, patients remained sensitive to increasing intensity of fear expression; their performances increased with intensity as much as that of HC participants. However, even at full-blown intensity, their performances remained inferior to that of HC participants.

Consistent with several studies in the literature, we observed a disgust recognition deficit in TLE patients compared to HC participants (Broicher et al., 2012; Gomez-Ibañez et al., 2014; Hennion et al., 2015). Disgust faces were mostly confused with angry faces. This error, previously described in HC participants (Calvo & Lundqvist, 2008; Palermo & Coltheart, 2004) as well as in TLE patients (Hennion et al., 2015), appears to be due to the shared eyelid and lip similarities of these two EFE (Ekman & Friesen, 2003). As with fear, TLE patients' deficits in disgust recognition did not only affect emotional expressions of intermediate intensity. Again, the results of the two studies manipulating emotional intensity were not replicated (Lin et al., 2022; Sedda et al., 2013). However, manipulating the level of emotional intensity of disgust revealed differences according to the localization of the epileptic focus. While the level of disgust intensity expressed by the faces did not appear to affect HC participants and TLE patients differently, with both groups increasing their performances with intensity, this variable did not have the same effect on the performances of the three TLE patient groups. LTLE and MTLE-noHS patients recognized disgust EFE less well at intermediate intensity than MTLE-HS patients did, but this difference was no longer present

when the emotional intensity was maximal. This difficulty in recognizing disgust was not observed in the studies by Hennion et al. (2015) and Meletti et al. (2009), although these authors had also examined different types of epilepsy. However, the divergence in results could possibly be explained by the exclusive use in these two studies of stimuli expressing full-blown intensity emotions, in contrast to the present study, which manipulated the level of emotional intensity, and thus the difficulty of the task. Moreover, according to brain imaging data, the processing of the emotion of disgust appears to mainly involve the insula as well as a whole limbic cortico-striatal-thalamic network that is distinct from the brain network involved in processing the emotion of fear (Calder et al., 2000; Krolak-Salmon et al., 2003; Phillips et al., 1997). Thus, dysfunction of this brain network could be the cause of the disgust recognition difficulties observed in LTLE and MTLE-noHS patients. Finally, this result suggests that the use of intermediate intensity EFE, instead of the EFE at a full-blown intensity used in the majority of studies, would allow for more precise identification of the differences between the groups of TLE patients.

The emotion of happiness was the most easily recognized by all participants including TLE patients (i.e., 97.4% correct recognition for TLE patients and 97.4% for HC participants). Given that it is the only positive emotion presented in this study, it is not surprising that happiness proved easier to recognize among negative emotions than to differentiate between negative emotions. As shown in several studies (Bonora et al., 2011; Gomez-Ibañez et al., 2014; Meletti, Benuzzi, Nichelli, et al., 2003; Meletti, Benuzzi, Rubboli, et al., 2003; Meletti et al., 2009; Reynders et al., 2005; Sedda et al., 2013; Tanaka et al., 2013), the performances of the TLE patients were not significantly different from those of the HC participants. However, our results showed that only HC participants improved their performances with increasing emotional intensity, as TLE patients' performances were not modulated by the emotional intensity of happiness. This lack of effect of emotional intensity for happiness, also found in the two studies manipulating this variable (Lin et al., 2022; Sedda et al., 2013), could perhaps be explained by a ceiling effect. However, the localization of the epileptic focus seems to influence the recognition of this emotion in TLE patients. Thus, MTLE-HS patients recognized less well happiness than MTLE-noHS patients. Moreover, the meta-analysis of fMRI studies by Fusar-Poli et al. (2009) revealed that the perception of facial expressions of happiness, as well as fear, two emotions of high arousal (Feldman Barrett & Russell, 1998), appear to activate the amygdala. This would explain the less good scores found in MTLE patients. However, it remains difficult to explain why the recognition of EFE of happiness is more affected by

MTLE-HS than by MTLE-noHS. Although this result should be confirmed by future studies involving other positive emotions, these data suggest for the first time a relative difficulty in recognizing a positive emotion of high arousal in MTLE-HS patients.

As for the recognition of the emotions of anger, sadness, or surprise, the performances of the TLE patients were not different from those of the HC participants. Moreover, no difference related to the localization of the epileptic focus was found for these emotions. Only a few studies found deficits in recognition of sadness (Bonora et al., 2011; Meletti et al., 2009; Tanaka et al., 2013) and anger facial expressions (Bonora et al., 2011; Meletti et al., 2009) in the presence of TLE. The hypothesis that the presence of TLE causes a global deficit in the recognition of negatively valenced emotions does not seem compatible with our results. Concerning surprise faces, our results are in agreement with the literature since no study, to our knowledge, has found a deficit in the recognition of surprise in TLE patients. Moreover, for both TLE patients and HC participants, increasing emotional intensity improved recognition of the emotions of anger and surprise. However, nuances were found for the emotion of surprise in TLE patients as a function of the localization of the epileptic focus. The performances of MTLE-HS and LTLE patients improved with increasing emotional intensity, but not those of MTLE-noHS patients, which were overall very high. Finally, surprisingly, increasing the emotional intensity of sad faces was associated with decreased performances for all participants. The higher the emotional intensity of the sadness stimuli, the more this facial expression was confused with disgust (i.e., 18-21% confusion for the three highest intensity levels vs. 2-11% for the first 7 levels). This result may be related to similarities in the mouth, with the corners of the mouth being lowered in both cases (Ekman & Friesen, 2003). This common feature would explain the frequent confusion between these two EFE, even at full-blown intensity.

In our study, we also showed that the EFE recognition abilities of both TLE patients and HC participants improved over successive trials. However, the within-task improvement in performance of TLE patients was smaller than that of HC participants suggesting some slowness in discriminative learning of facial emotions in the presence of TLE.

Consideration of the demographic and clinical data of the participants recruited in this study clarified the effect of certain variables on recognition of EFE. Although the patients did not differ from the HC participants in terms of age, education level, and sex distribution, an effect of education level on recognition of EFE was found, with higher scores for participants

with higher education levels, regardless of the presence or absence of a TLE. To our knowledge, only the study by Meletti et al. (2009) tested this effect on EFE recognition abilities. These authors showed an effect of education level only in MTLE patients and not in HC participants. However, the variation in the education level in the control group of the Meletti et al. (2009) is smaller than that of the control group of the present study. This would explain why this factor did not affect the performances of the HC participants in the study of Meletti et al. (2009). Thus, the higher the level of education, generally associated with increased cognitive reserve, the better the performances in recognizing EFE would be. Another demographic variable seems to modulate the results. Women's performances were indeed higher than men's, an effect was not found in TLE patients (Meletti et al., 2009; Reynders et al., 2005; Tanaka et al., 2013). However, we used only female faces, in contrast to these previous studies, which used both male and female faces. Thus, the superior performances of women in recognizing EFEs expressed by a woman could be due to the use of same-sex faces. Indeed, in the study of Wells et al. (2016), emotions expressed by female faces were better recognized than those expressed by male faces, and this advantage was even greater in women. Thus, female TLE patients, like HC participants, appear to benefit from facilitated recognition, given that the EFE is expressed by a female face. Finally, we did not find an age effect on EFE recognition performances. This result is in agreement with the only study that tested this effect (Reynders et al., 2005). However, it is important to remember that we did not include patients older than 55 years. Therefore, it is not possible at this stage to ensure that an age effect would not have emerged with the inclusion of older participants (Orgeta & Phillips, 2008; for review, Arioli et al., 2018).

Finally, among the clinical variables, only an effect of the number of ASMs was found with worse EFE recognition performances in TLE patients taking more ASMs. Although Meletti et al. (2009) did not find any difference in performances between patients on mono-, bi-, or polytherapy, Hlobil et al. (2008) noted that difficulties in fear recognition increased with the number of ASMs taken at the time of the test underlining. The link between ASMs taking and the recognition of EFE thus remains debated. In accordance with several studies (Amlerova et al., 2014; Broicher et al., 2012; Hennion et al., 2015; Tanaka et al., 2013), we did not find an effect of age on onset of epilepsy on recognition of EFE. A few studies have, however, shown that this factor influenced the recognition of EFE in TLE patients (Meletti, Benuzzi, Rubboli, et al., 2003; Meletti et al., 2009; Sedda et al., 2013). A possible explanation for this divergence in results may be that these studies did not control for the etiology of epilepsy as well as for the localization of epileptic focus already discussed. It is indeed not mentioned in

these studies whether the presence of HS was taken into account in the analyses. However, patients with MTLE-HS have an earlier onset of epilepsy than other types of TLE (Wieser, 2004). In our study, the median age at onset of epilepsy in the MTLE-HS group was 11 years compared to 15 years for the LTLE group and 19 years for the MTLE-noHS group. When controlling for the localization of the epileptic focus, the age at onset of epilepsy was not found to influence EFE recognition abilities. It therefore appears to be the localization of the epileptic focus, possibly related to the etiology of epilepsy, and not the age at onset of disease that influenced the recognition of EFE. Finally, we found no effect of seizure frequency on EFE recognition performances, consistent with the literature (Amlerova et al., 2014; Hennion et al., 2015; Reynders et al., 2005). High seizure frequency therefore appears not to impact EFE recognition performances in TLE patients. However, in patients with drug-resistant epilepsy, the overall very high number of seizures may make it difficult to take this factor into account.

However, this study has several limitations. Firstly, we did not use a control task, such as the Benton Facial Recognition Test (BFRT, Benton et al., 1983), to exclude the presence of face discrimination disorders. According to several studies testing the EFE recognition abilities of TLE patients (Hennion et al., 2015; Meletti, Benuzzi, Rubboli, et al., 2003; Meletti et al., 2009; Reynders et al., 2005) and the study of Volfart et al. (2020), TLE patients do not exhibit a face discrimination deficit. It is therefore not likely that a face perception disorder contaminated the results reported in this study. Moreover, we did not take into account level of depression, anxiety, apathy, or quality of life, whereas links between these variables and EFE recognition performances could be found for some emotions (Hennion et al., 2015; Reynders et al., 2005). Indeed, the data reported here, which concern a large number of patients, were collected during a pre-surgical neuropsychological assessment over a 20-year period. Data concerning mood and quality of life were not available for some patients and therefore could not be considered. We cannot therefore exclude the influence of these factors on our results.

In conclusion, the results of this study showed that TLE patients did not present a global deficit of EFE recognition abilities, but that these difficulties concerned certain emotions. Indeed, these EFE recognition disorders were manifested differently according to the localization of the epileptic focus (i.e., MTLE with HS, MTLE without HS, LTLE), but not according to the cerebral lateralization of TLE. Thus, expressions of fear were less well recognized in the presence of an MTLE, associated or not with a HS, whereas expressions of disgust were less well recognized in the presence of a LTLE or an MTLE without HS. For the

disgust emotion, the results were modulated by emotional intensity. Our results also seem to reveal a greater facility of MTLE-noHS patients to recognize facial expressions of happiness compared to MTLE-HS patients. In contrast to previous studies (Lin et al., 2022; Sedda et al., 2013), the patients' deficits in recognition of EFE appear not to be limited to facial expressions of intermediate intensity, but rather seemed to involve all levels of emotional intensity that we tested. The results showed that, with the exception of sadness and, to some extent happiness, recognition of fear, disgust, anger, and surprise improved with emotion intensity for all participants. The results also showed the influence of education and sex, but not age on recognition of EFE, as well as an effect of the number of ASMs but not of age at onset of disease, nor of the frequency of seizures. Finally, there was an improvement in performances over successive trials of the task, although this effect was less marked in TLE patients than in HC participants, suggesting slower within-task learning of EFE recognition within a task in patients. Identifying and specifying the nature of disorders in the recognition of EFE in TLE patients, as part of a routine neuropsychological assessment, seems essential to improving the care of social cognition disorders in these patients. Rehabilitation of social signal processing difficulties such as EFE could thus reduce the social cognition disorders frequently observed in TLE patients (Giovagnoli et al., 2013, 2021; Hermann et al., 2008). Future studies will be necessary to test in a population of TLE patients the effect of such care as has already been developed for patients with traumatic brain injury (Vallat-Azouvi et al., 2019). Finally, given that these patients were all candidates for surgical treatment, it would be interesting to compare their EFE recognition performances obtained before surgery with those obtained after surgery, in order to identify the impact of surgery on these abilities in a longitudinal study.

**Acknowledgments:** The authors would like to thank all participants who agreed to take part in this study.

**Funding:** This article was supported by the European Center for the Humanities and Social Sciences (MESHS-Lille, France), by the Hauts-de-France Regional Council, and by the University of Lille for Clémence Nineuil and the Institut Universitaire de France for Séverine Samson.

## References

- Adolphs, R. (2002). Neural systems for recognizing emotion. *Current Opinion in Neurobiology*, 12(2), 169–177. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(02\)00301-X](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(02)00301-X)
- Adolphs, R. (2010). What does the amygdala contribute to social cognition? *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1191(1), 42–61. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05445.x>
- Adolphs, R., Tranel, D., & Damasio, H. (1994). *Impaired recognition of emotion in facial expressions following bilateral damage to the human amygdala*. 372, 4.
- Adolphs, R., Tranel, D., Damasio, H., & Damasio, A. R. (1995). Fear and the human amygdala. *Journal of Neuroscience*, 15(9), 5879–5891.
- Adolphs, R., Tranel, D., Hamann, S., Young, A. W., Calder, A. J., Phelps, E. A., Anderson, A., Lee, G. P., & Damasio, A. R. (1999). Recognition of facial emotion in nine individuals with bilateral amygdala damage. *Neuropsychologia*, 37(10), 1111–1117. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(99\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(99)00039-1)
- Allone, C., Buono, V. L., Corallo, F., Pisani, L. R., Pollicino, P., Bramanti, P., & Marino, S. (2017). Neuroimaging and cognitive functions in temporal lobe epilepsy: A review of the literature. *Journal of the Neurological Sciences*, 381, 7–15.
- Amlerova, J., Cavanna, A. E., Bradac, O., Javurkova, A., Raudenska, J., & Marusic, P. (2014). Emotion recognition and social cognition in temporal lobe epilepsy and the effect of epilepsy surgery. *Epilepsy & Behavior*, 36, 86–89. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2014.05.001>
- Anderson, A. K., & Phelps, E. A. (2000). Expression Without Recognition: Contributions of the Human Amygdala to Emotional Communication. *Psychological Science*, 11(2), 106–111. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00224>
- Arioli, M., Crespi, C., & Canessa, N. (2018). Social Cognition through the Lens of Cognitive and Clinical Neuroscience. *BioMed Research International*, 2018, e4283427. <https://doi.org/10.1155/2018/4283427>
- Benton, A. L., Hamsher, K. deS, Varney, N. R., & Spreen, O. (1983). *Contributions to Neuropsychological Assessment: A Clinical Manual* (Second Edition). Oxford University Press.
- Blümcke, I., Thom, M., Aronica, E., Armstrong, D. D., Bartolomei, F., Bernasconi, A., Bernasconi, N., Bien, C. G., Cendes, F., Coras, R., Cross, J. H., Jacques, T. S., Kahane, P., Mathern, G. W., Miyata, H., Moshé, S. L., Oz, B., Özkara, Ç., Perucca, E., ... Spreafico, R. (2013). International consensus classification of hippocampal sclerosis in temporal lobe epilepsy: A Task Force

- report from the ILAE Commission on Diagnostic Methods. *Epilepsia*, 54(7), 1315–1329. <https://doi.org/10.1111/epi.12220>
- Bonora, A., Benuzzi, F., Monti, G., Mirandola, L., Pugnaghi, M., Nichelli, P., & Meletti, S. (2011). Recognition of emotions from faces and voices in medial temporal lobe epilepsy. *Epilepsy & Behavior*, 20(4), 648–654. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2011.01.027>
- Bora, E., & Meletti, S. (2016). Social cognition in temporal lobe epilepsy: A systematic review and meta-analysis. *Epilepsy & Behavior*, 60, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2016.04.024>
- Broicher, S. D., Kuchukhidze, G., Grunwald, T., Krämer, G., Kurthen, M., & Jokeit, H. (2012). “Tell me how do I feel” – Emotion recognition and theory of mind in symptomatic mesial temporal lobe epilepsy. *Neuropsychologia*, 50(1), 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.11.005>
- Bruyer, R., & Granato, P. (1999). Categorical effects in the perception of facial expressions; MARIE - A simple and discriminating clinical tool. *Revue Europeene de Psychologie Appliquee*, 49(1), 3.
- Calder, A. J., Keane, J., Manes, F., Antoun, N., & Young, A. W. (2000). Impaired recognition and experience of disgust following brain injury. *Nature Neuroscience*, 3(11), 1077–1078. <https://doi.org/10.1038/80586>
- Calder, A. J., Young, A. W., Rowland, D., Perrett, D. I., Hodges, J. R., & Etcoff, N. L. (1996). *Facial Emotion Recognition after Bilateral Amygdala Damage: Differentially Severe Impairment of Fear*. 47.
- Calvo, M. G., & Lundqvist, D. (2008). Facial expressions of emotion (KDEF): Identification under different display-duration conditions. *Behavior Research Methods*, 40(1), 109–115. <https://doi.org/10.3758/BRM.40.1.109>
- Cheng, C.-M., Chen, H.-C., Chan, Y.-C., Su, Y.-C., & Tseng, C.-C. (2013). Taiwan corpora of Chinese emotions and relevant psychophysiological data—Normative data for Chinese jokes. *Chinese Journal of Psychology*, 55(4), 555–569.
- Dellacherie, D., Hasboun, D., Baulac, M., Belin, P., & Samson, S. (2011). Impaired recognition of fear in voices and reduced anxiety after unilateral temporal lobe resection. *Neuropsychologia*, 49(4), 618–629. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.11.008>
- Edwards, M., Stewart, E., Palermo, R., & Lah, S. (2017). Facial emotion perception in patients with epilepsy: A systematic review with meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 83, 212–225. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.10.013>

- Ekman, P. (1992). An argument for basic emotions. *Cognition & Emotion*, 6(3–4), 169–200.
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1976). Measuring facial movement. *Environmental Psychology and Nonverbal Behavior*, 1(1), 56–75.
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (2003). *Unmasking the Face: A Guide to Recognizing Emotions from Facial Clues*. ISHK.
- Feldman Barrett, L., & Russell, J. A. (1998). Independence and bipolarity in the structure of current affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 74(4), 967–984. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.74.4.967>
- Fusar-Poli, P., Placentino, A., Carletti, F., Landi, P., Allen, P., Surguladze, S., Benedetti, F., Abbamonte, M., Gasparotti, R., Barale, F., Perez, J., McGuire, P., & Politi, P. (2009). Functional atlas of emotional faces processing: A voxel-based meta-analysis of 105 functional magnetic resonance imaging studies. *Journal of Psychiatry & Neuroscience: JPN*, 34(6), 418–432.
- Giovagnoli, A. R., Parente, A., Ciuffini, R., Tallarita, G. M., Turner, K., Maialetti, A., Marrelli, A. M., Pucci, B., & the Study Group on Cognitive Neurology, Neuropsychology – Adult Section of the Italian League Against Epilepsy. (2021). Diversified social cognition in temporal lobe epilepsy. *Acta Neurologica Scandinavica*, 143(4), 396–406. <https://doi.org/10.1111/ane.13386>
- Giovagnoli, A. R., Parente, A., Villani, F., Franceschetti, S., & Spreafico, R. (2013). Theory of mind and epilepsy: What clinical implications? *Epilepsia*, 54(9), 1639–1646. <https://doi.org/10.1111/epi.12255>
- Gomez-Ibañez, A., Urrestarazu, E., & Viteri, C. (2014). Recognition of facial emotions and identity in patients with mesial temporal lobe and idiopathic generalized epilepsy: An eye-tracking study. *Seizure*, 23(10), 892–898. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2014.08.012>
- Gosselin, N., Peretz, I., Hasboun, D., Baulac, M., & Samson, S. (2011). Impaired recognition of musical emotions and facial expressions following anteromedial temporal lobe excision. *Cortex*, 47(9), 1116–1125. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.05.012>
- Granato, P., & Bruyer, R. (2002). Measurement of the perception of facially expressed emotions by a computerized device: Method of analysis and research for the integration of emotions (MARIE). *European Psychiatry*, 17(6), 339–348. [https://doi.org/10.1016/S0924-9338\(02\)00684-3](https://doi.org/10.1016/S0924-9338(02)00684-3)
- Habel, U., Windischberger, C., Derntl, B., Robinson, S., Kryspin-Exner, I., Gur, R. C., & Moser, E. (2007). Amygdala activation and facial expressions: Explicit emotion discrimination versus implicit emotion processing. *Neuropsychologia*, 45(10), 2369–2377. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.01.023>

- Hennion, S., Szurhaj, W., Duhamel, A., Lopes, R., Tyvaert, L., Derambure, P., & Delbeuck, X. (2015). Characterization and prediction of the recognition of emotional faces and emotional bursts in temporal lobe epilepsy. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 37(9), 931–945. <https://doi.org/10.1080/13803395.2015.1068280>
- Hermann, B., Seidenberg, M., & Jones, J. (2008). The neurobehavioural comorbidities of epilepsy: Can a natural history be developed? *The Lancet Neurology*, 7(2), 151–160. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(08\)70018-8](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(08)70018-8)
- Hess, U., Blairy, S., & Kleck, R. E. (1997). The Intensity of Emotional Facial Expressions and Decoding Accuracy. *Journal of Nonverbal Behavior*, 21(4), 241–257. <https://doi.org/10.1023/A:1024952730333>
- Hlobil, U., Rathore, C., Alexander, A., Sarma, S., & Radhakrishnan, K. (2008). Impaired facial emotion recognition in patients with mesial temporal lobe epilepsy associated with hippocampal sclerosis (MTLE-HS): Side and age at onset matters. *Epilepsy Research*, 80(2–3), 150–157. <https://doi.org/10.1016/j.eplepsyres.2008.03.018>
- Kotwas, I., McGonigal, A., Bastien-Toniazzo, M., Bartolomei, F., & Micoulaud-Franchi, J.-A. (2017). Stress regulation in drug-resistant epilepsy. *Epilepsy & Behavior*, 71, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2017.01.025>
- Krolak-Salmon, P., Hénaff, M.-A., Isnard, J., Tallon-Baudry, C., Guénot, M., Vighetto, A., Bertrand, O., & Mauguière, F. (2003). An attention modulated response to disgust in human ventral anterior insula. *Annals of Neurology*, 53(4), 446–453. <https://doi.org/10.1002/ana.10502>
- Lin, Y.-H., Hsin, Y.-L., Li, R.-H., Liu, C.-K., Wang, R.-Y., & Wang, W.-H. (2022). The effect of facial expression intensity on emotion recognition and psychosocial performance in patients with frontal or temporal lobe epilepsy. *Epilepsy & Behavior*, 126, 108462. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2021.108462>
- Meletti, S., Benuzzi, F., Cantalupo, G., Rubboli, G., Tassinari, C. A., & Nichelli, P. (2009). Facial emotion recognition impairment in chronic temporal lobe epilepsy. *Epilepsia*, 50(6), 1547–1559. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2008.01978.x>
- Meletti, S., Benuzzi, F., Nichelli, P., & Tassinari, C. A. (2003). Damage to the Right Hippocampal-Amygdala Formation during Early Infancy and Recognition of Fearful Faces: Neuropsychological and fMRI Evidence in Subjects with Temporal Lobe Epilepsy. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1000(1), 385–388. <https://doi.org/10.1196/annals.1280.036>

- Meletti, S., Benuzzi, F., Rubboli, G., Cantalupo, G., Stanzani Maserati, M., Nichelli, P., & Tassinari, C. A. (2003). Impaired facial emotion recognition in early-onset right mesial temporal lobe epilepsy. *Neurology*, 60(3), 426–431. <https://doi.org/10.1212/WNL.60.3.426>
- Meletti, S., Cantalupo, G., Santoro, F., Benuzzi, F., Marliani, A. F., Tassinari, C. A., & Rubboli, G. (2014). Temporal lobe epilepsy and emotion recognition without amygdala: A case study of Urbach-Wiethe disease and review of the literature. *Epileptic Disorders*, 16(4), 518–527. <https://doi.org/10.1684/epd.2014.0696>
- Meletti, S., Picardi, A., De Risi, M., Monti, G., Esposito, V., Grammaldo, L. G., & Di Gennaro, G. (2014). The affective value of faces in patients achieving long-term seizure freedom after temporal lobectomy. *Epilepsy & Behavior*, 36, 97–101. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2014.05.002>
- Monti, G., & Meletti, S. (2015). Emotion recognition in temporal lobe epilepsy: A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 55, 280–293. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.05.009>
- Orgeta, V., & Phillips, L. H. (2008). Effects of age and emotional intensity on the recognition of facial emotion. *Experimental Aging Research*, 34(1), 63–79. <https://doi.org/10.1080/03610730701762047>
- Palermo, R., & Coltheart, M. (2004). Photographs of facial expression: Accuracy, response times, and ratings of intensity. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 36(4), 634–638. <https://doi.org/10.3758/BF03206544>
- Phillips, M. L., Young, A. W., Senior, C., Brammer, M., Andrew, C., Calder, A. J., Bullmore, E. T., Perrett, D. I., Rowland, D., Williams, S. C. R., Gray, J. A., & David, A. S. (1997). A specific neural substrate for perceiving facial expressions of disgust. *Nature*, 389(6650), 495–498. <https://doi.org/10.1038/39051>
- Reynders, H. J., Broks, P., Dickson, J. M., Lee, C. E., & Turpin, G. (2005). Investigation of social and emotion information processing in temporal lobe epilepsy with ictal fear. *Epilepsy & Behavior*, 7(3), 419–429. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2005.07.013>
- Sedda, A., Rivolta, D., Scarpa, P., Burt, M., Frigerio, E., Zanardi, G., Piazzini, A., Turner, K., Canevini, M. P., Francione, S., Lo Russo, G., & Bottini, G. (2013). Ambiguous emotion recognition in temporal lobe epilepsy: The role of expression intensity. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 13(3), 452–463. <https://doi.org/10.3758/s13415-013-0153-y>

- Steiger, B. K., & Jokeit, H. (2017). Why epilepsy challenges social life. *Seizure*, 44, 194–198. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2016.09.008>
- Steiger, B. K., Muller, A. M., Spirig, E., Toller, G., & Jokeit, H. (2017). Mesial temporal lobe epilepsy diminishes functional connectivity during emotion perception. *Epilepsy Research*, 134, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.epilepsyres.2017.05.004>
- Stewart, E., Lah, S., & Smith, M. L. (2019). Patterns of impaired social cognition in children and adolescents with epilepsy: The borders between different epilepsy phenotypes. *Epilepsy & Behavior*, 100, 106146. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2019.01.031>
- Tanaka, A., Akamatsu, N., Yamano, M., Nakagawa, M., Kawamura, M., & Tsuji, S. (2013). A more realistic approach, using dynamic stimuli, to test facial emotion recognition impairment in temporal lobe epilepsy. *Epilepsy & Behavior*, 28(1), 12–16. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2013.03.022>
- Vallat-Azouvi, C., Azouvi, P., Le-Bornec, G., & Brunet-Gouet, E. (2019). Treatment of social cognition impairments in patients with traumatic brain injury: A critical review. *Brain Injury*, 33(1), 87–93. <https://doi.org/10.1080/02699052.2018.1531309>
- Volfart, A., Jonas, J., Maillard, L., Busigny, T., Rossion, B., & Brissart, H. (2020). Typical visual unfamiliar face individuation in left and right mesial temporal epilepsy. *Neuropsychologia*, 147, 107583. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107583>
- Wells, L. J., Gillespie, S. M., & Rotshtein, P. (2016). Identification of Emotional Facial Expressions: Effects of Expression, Intensity, and Sex on Eye Gaze. *PLOS ONE*, 11(12), e0168307. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168307>
- Wieser, H. G. (2004). ILAE Commission Report. Mesial temporal lobe epilepsy with hippocampal sclerosis. *Epilepsia*, 45(6), 695–714. <https://doi.org/10.1111/j.0013-9580.2004.09004.x>
- Xu, P., Peng, S., Luo, Y., & Gong, G. (2021). Facial expression recognition: A meta-analytic review of theoretical models and neuroimaging evidence. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 127, 820–836. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.05.023>

## Supplementary Materials

**Table 9.**

GLMM results on correct recognition to compare the two groups of participants (patients with unilateral temporal lobe epilepsy and healthy control participants).

|                                                                    | Wald Chisq | df | p       |
|--------------------------------------------------------------------|------------|----|---------|
| Age                                                                | 0.24       | 1  | 0.624   |
| Sex                                                                | 7.69       | 1  | 0.006*  |
| Years of education                                                 | 13.2       | 1  | <0.001* |
| Group                                                              | 5.15       | 1  | 0.023*  |
| Type of emotion                                                    | 1060.86    | 5  | <0.001* |
| Emotional intensity                                                | 99.43      | 1  | <0.001* |
| Presentation order                                                 | 76.05      | 1  | <0.001* |
| Group x Type of emotion                                            | 41.82      | 5  | <0.001* |
| Group x Emotional intensity                                        | 1.88       | 1  | 0.170   |
| Group x Presentation order                                         | 8.66       | 1  | 0.003*  |
| Type of emotion x Emotional intensity                              | 190.25     | 5  | <0.001* |
| Type of emotion x Presentation order                               | 87.12      | 5  | <0.001* |
| Presentation order x Emotional intensity                           | 2.94       | 1  | 0.086   |
| Group x Type of emotion x Emotional intensity                      | 13.1       | 5  | 0.022*  |
| Group x Type of emotion x Presentation order                       | 3.72       | 5  | 0.591   |
| Group x Emotional intensity x Presentation order                   | 3.36       | 1  | 0.067   |
| Type of emotion x Emotional intensity x Presentation order         | 20.08      | 5  | 0.001*  |
| Group x Type of emotion x Emotional intensity x Presentation order | 3.48       | 5  | 0.627   |

Notes. Type II Wald chi-square tests on main and interaction terms of the fitted GLMM were reported with Wald  $\chi^2$  statistic and degrees of freedom (df)

**Table 10.**

GLMM results on correct recognition to compare the three TLE groups of patients (LTLE, MTLE-noHS, MTLE-HS).

|                                                                         | Wald Chisq | df | p       |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|----|---------|
| Age                                                                     | 0.63       | 1  | 0.429   |
| Sexe                                                                    | 7.39       | 1  | 0.007*  |
| Years of education                                                      | 8.58       | 1  | 0.003*  |
| Side of epilepsy focus                                                  | 0.06       | 1  | 0.805   |
| ASMs number                                                             | 4.94       | 1  | 0.026*  |
| Age at onset                                                            | 0.6        | 1  | 0.440   |
| Seizure frequency                                                       | 0.59       | 1  | 0.444   |
| TLE groups                                                              | 1.14       | 2  | 0.564   |
| Type of emotion                                                         | 829.01     | 5  | <0.001* |
| Emotional intensity                                                     | 73.01      | 1  | <0.001* |
| Presentation order                                                      | 43.68      | 1  | <0.001* |
| TLE groups x Type of emotion                                            | 69.93      | 10 | <0.001* |
| TLE groups x Emotional intensity                                        | 0.42       | 2  | 0.811   |
| TLE groups x Presentation order                                         | 2.37       | 2  | 0.306   |
| Type of emotion x Emotional intensity                                   | 136.85     | 5  | <0.001* |
| Type of emotion x Presentation order                                    | 65.63      | 5  | <0.001* |
| Emotional intensity x Presentation order                                | 0.62       | 1  | 0.431   |
| TLE groups x Type of emotion x Emotional intensity                      | 20.27      | 10 | 0.027*  |
| TLE groups x Type of emotion x Presentation order                       | 11.48      | 10 | 0.321   |
| TLE groups x Emotional intensity x Presentation order                   | 4.24       | 2  | 0.120   |
| Type of emotion x Emotional intensity x Presentation order              | 17.48      | 5  | 0.004*  |
| TLE groups x Type of emotion x Emotional intensity x Presentation order | 8.91       | 10 | 0.541   |

Notes. Type II Wald chi-square tests on main and interaction terms of the fitted GLMM were reported with Wald  $\chi^2$  statistic and degrees of freedom (df).

Abbreviations: ASMs = Antiseizure medications; TLE = temporal lobe epilepsy.

**Table 11.**

Confusion matrix of emotion recognition of TLE patients and HC participants

|        |           | HC participants |               |               |               |               |               |               |                | TLE patients   |                |              |                |                |                |
|--------|-----------|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|
| Target | Surprise  | n=680 [16.7%]   | 0 (0%)        | 0 (0%)        | 11 (1.6%)     | 17 (2.5%)     | 1 (0.1%)      | 651 (95.7%)   | n=2720 [16.7%] | 2 (0.1%)       | 7 (0.3%)       | 36 (1.3%)    | 146 (5.4%)     | 12 (0.4%)      | 2517 (92.5%)   |
|        | Sadness   | n=680 [16.7%]   | 14 (2.1%)     | 55 (8.1%)     | 2 (0.3%)      | 0 (0%)        | 600 (88.2%)   | 9 (1.3%)      | n=2720 [16.7%] | 45 (1.7%)      | 279 (10.3%)    | 36 (1.3%)    | 7 (0.3%)       | 2321 (85.3%)   | 32 (1.2%)      |
|        | Happiness | n=680 [16.7%]   | 0 (0%)        | 0 (0%)        | 0 (0%)        | 662 (97.4%)   | 2 (0.3%)      | 16 (2.4%)     | n=2720 [16.7%] | 0 (0%)         | 0 (0%)         | 1 (0%)       | 2648 (97.4%)   | 2 (0.1%)       | 69 (2.5%)      |
|        | Fear      | n=680 [16.7%]   | 10 (1.5%)     | 19 (2.8%)     | 532 (78.2%)   | 0 (0%)        | 11 (1.6%)     | 108 (15.9%)   | n=2720 [16.7%] | 67 (2.5%)      | 99 (3.6%)      | 1822 (67%)   | 2 (0.1%)       | 80 (2.9%)      | 650 (23.9%)    |
|        | Disgust   | n=680 [16.7%]   | 47 (6.9%)     | 628 (92.4%)   | 1 (0.1%)      | 0 (0%)        | 4 (0.6%)      | 0 (0%)        | n=2720 [16.7%] | 445 (16.4%)    | 2204 (81%)     | 9 (0.3%)     | 0 (0%)         | 54 (2%)        | 8 (0.3%)       |
|        | Anger     | n=680 [16.7%]   | 507 (74.6%)   | 78 (11.5%)    | 5 (0.7%)      | 1 (0.1%)      | 32 (4.7%)     | 57 (8.4%)     | n=2720 [16.7%] | 2070 (76.1%)   | 376 (13.8%)    | 57 (2.1%)    | 4 (0.1%)       | 109 (4%)       | 104 (3.8%)     |
|        | Response  |                 | Anger         | Disgust       | Fear          | Happiness     | Sadness       | Surprise      |                | Anger          | Disgust        | Fear         | Happiness      | Sadness        | Surprise       |
|        |           |                 | n=578 [14.2%] | n=780 [19.1%] | n=551 [13.5%] | n=680 [16.7%] | n=650 [15.9%] | n=841 [20.6%] |                | n=2629 [16.1%] | n=2965 [18.2%] | n=1961 [12%] | n=2807 [17.2%] | n=2578 [15.6%] | n=3380 [20.7%] |

**Table 12.**

Confusion matrix of emotion recognition of three TLE groups (i.e., LTLE, MTLE-noHS, and MTLE-HS) and HC participants

| Target   | HC participants             |                         |                           |                        |                             |                           |                            | n=510 [16.7%] | LTLE patients              |                        |                          |                       |                            |                          |                           |
|----------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------|----------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|
|          | Surprise<br>n=680 [16.7%]   | 0 (0%)                  | 0 (0%)                    | 11 (1.6%)              | 17 (2.5%)                   | 1 (0.1%)                  | 651 (95.7%)                |               | Surprise<br>n=510 [16.7%]  | 0 (0%)                 | 1 (0.2%)                 | 10 (2%)               | 28 (5.5%)                  | 0 (0%)                   | 471 (92.4%)               |
|          | Sadness<br>n=680 [16.7%]    | 14 (2.1%)               | 55 (8.1%)                 | 2 (0.3%)               | 0 (0%)                      | 600 (88.2%)               | 9 (1.3%)                   |               | Sadness<br>n=510 [16.7%]   | 9 (1.8%)               | 49 (9.6%)                | 5 (1%)                | 0 (0%)                     | 445 (87.3%)              | 2 (0.4%)                  |
|          | Happiness<br>n=680 [16.7%]  | 0 (0%)                  | 0 (0%)                    | 0 (0%)                 | 662 (97.4%)                 | 2 (0.3%)                  | 16 (2.4%)                  |               | Happiness<br>n=510 [16.7%] | 0 (0%)                 | 0 (0%)                   | 1 (0.2%)              | 500 (98%)                  | 1 (0.2%)                 | 8 (1.6%)                  |
|          | Fear<br>n=680 [16.7%]       | 10 (1.5%)               | 19 (2.8%)                 | 532 (78.2%)            | 0 (0%)                      | 11 (1.6%)                 | 108 (15.9%)                |               | Fear<br>n=510 [16.7%]      | 7 (1.4%)               | 21 (4.1%)                | 394 (77.3%)           | 1 (0.2%)                   | 13 (2.5%)                | 74 (14.5%)                |
|          | Disgust<br>n=680 [16.7%]    | 47 (6.9%)               | 628 (92.4%)               | 1 (0.1%)               | 0 (0%)                      | 4 (0.6%)                  | 0 (0%)                     |               | Disgust<br>n=510 [16.7%]   | 111 (21.8%)            | 392 (76.9%)              | 1 (0.2%)              | 0 (0%)                     | 6 (1.2%)                 | 0 (0%)                    |
|          | Anger<br>n=680 [16.7%]      | 507 (74.6%)             | 78 (11.5%)                | 5 (0.7%)               | 1 (0.1%)                    | 32 (4.7%)                 | 57 (8.4%)                  |               | Anger<br>n=510 [16.7%]     | 389 (76.3%)            | 69 (13.5%)               | 6 (1.2%)              | 1 (0.2%)                   | 29 (5.7%)                | 16 (3.1%)                 |
|          |                             | Anger<br>n=578 [14.2%]  | Disgust<br>n=780 [19.1%]  | Fear<br>n=551 [13.5%]  | Happiness<br>n=680 [16.7%]  | Sadness<br>n=650 [15.9%]  | Surprise<br>n=841 [20.6%]  |               |                            | Anger<br>n=516 [16.9%] | Disgust<br>n=532 [17.4%] | Fear<br>n=417 [13.6%] | Happiness<br>n=530 [17.3%] | Sadness<br>n=494 [16.1%] | Surprise<br>n=571 [18.7%] |
|          | MTLE-HS patients            |                         |                           |                        |                             |                           |                            | n=470 [16.7%] | MTLE-noHS patients         |                        |                          |                       |                            |                          |                           |
|          | Surprise<br>n=1740 [16.7%]  | 2 (0.1%)                | 6 (0.3%)                  | 23 (1.3%)              | 99 (5.7%)                   | 12 (0.7%)                 | 1598 (91.8%)               |               | Surprise<br>n=470 [16.7%]  | 0 (0%)                 | 0 (0%)                   | 3 (0.6%)              | 19 (4%)                    | 0 (0%)                   | 448 (95.3%)               |
|          | Sadness<br>n=1740 [16.7%]   | 29 (1.7%)               | 174 (10%)                 | 28 (1.6%)              | 7 (0.4%)                    | 1473 (84.7%)              | 29 (1.7%)                  |               | Sadness<br>n=470 [16.7%]   | 7 (1.5%)               | 56 (11.9%)               | 3 (0.6%)              | 0 (0%)                     | 403 (85.7%)              | 1 (0.2%)                  |
|          | Happiness<br>n=1740 [16.7%] | 0 (0%)                  | 0 (0%)                    | 0 (0%)                 | 1682 (96.7%)                | 1 (0.1%)                  | 57 (3.3%)                  |               | Happiness<br>n=470 [16.7%] | 0 (0%)                 | 0 (0%)                   | 0 (0%)                | 466 (99.1%)                | 0 (0%)                   | 4 (0.9%)                  |
|          | Fear<br>n=1740 [16.7%]      | 56 (3.2%)               | 66 (3.8%)                 | 1125 (64.7%)           | 1 (0.1%)                    | 50 (2.9%)                 | 442 (25.4%)                |               | Fear<br>n=470 [16.7%]      | 4 (0.9%)               | 12 (2.6%)                | 303 (64.5%)           | 0 (0%)                     | 17 (3.6%)                | 134 (28.5%)               |
|          | Disgust<br>n=1740 [16.7%]   | 241 (13.9%)             | 1441 (82.8%)              | 7 (0.4%)               | 0 (0%)                      | 44 (2.5%)                 | 7 (0.4%)                   |               | Disgust<br>n=470 [16.7%]   | 93 (19.8%)             | 371 (78.9%)              | 1 (0.2%)              | 0 (0%)                     | 4 (0.9%)                 | 1 (0.2%)                  |
|          | Anger<br>n=1740 [16.7%]     | 1294 (74.4%)            | 247 (14.2%)               | 48 (2.8%)              | 3 (0.2%)                    | 73 (4.2%)                 | 75 (4.3%)                  |               | Anger<br>n=470 [16.7%]     | 387 (82.3%)            | 60 (12.8%)               | 3 (0.6%)              | 0 (0%)                     | 7 (1.5%)                 | 13 (2.8%)                 |
|          |                             | Anger<br>n=1622 [15.5%] | Disgust<br>n=1934 [18.5%] | Fear<br>n=1231 [11.8%] | Happiness<br>n=1732 [17.2%] | Sadness<br>n=1653 [15.8%] | Surprise<br>n=2208 [21.1%] |               |                            | Anger<br>n=491 [17.4%] | Disgust<br>n=499 [17.7%] | Fear<br>n=313 [11.1%] | Happiness<br>n=485 [17.2%] | Sadness<br>n=431 [15.3%] | Surprise<br>n=601 [21.3%] |
| Response |                             |                         |                           |                        |                             |                           |                            |               |                            |                        |                          |                       |                            |                          |                           |



## DISCUSSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de cette thèse est d'évaluer l'impact de l'arousal et de la valence émotionnelle sur la mémoire musicale et d'améliorer nos connaissances sur le rôle du lobe temporal dans le processus de consolidation des informations musicales en étudiant les performances de patients ayant bénéficié d'une résection du lobe temporal médian incluant l'amygdale et l'hippocampe par comparaison à des adultes sains.

La discussion générale qui suit est divisée en trois parties. La première partie est consacrée à la discussion des effets de l'arousal et de la valence sur la mémoire musicale d'une population témoin et la seconde partie à la discussion de ces mêmes effets auprès d'une population de patients ayant bénéficié d'une résection du lobe temporal médian (LTM) incluant l'amygdale et l'hippocampe. Chacune de ces sections inclut une discussion des résultats principaux en lien avec la littérature existante et les limites de nos études. Nous terminerons cette discussion générale par une réflexion sur les perspectives de recherches futures et les applications cliniques de ces observations.

### 1. L'impact de l'arousal et de la valence sur la mémoire musicale d'une population témoin

L'Article I (Nineuil et al., 2020) a évalué l'impact des dimensions émotionnelles sur la mémoire musicale, et notamment sur le processus de consolidation, d'adultes sains en comparant les effets de l'arousal et de la valence sur la reconnaissance d'extraits musicaux après un délai de 15 minutes et après un délai de 24 heures. Les résultats ont montré que les extraits de valence négative étaient mieux reconnus que ceux de valence positive après un délai de 15 minutes. En revanche, l'inverse était retrouvé après un délai de 24 heures, avec de meilleures performances pour les stimuli de valence positive. De plus, les extraits musicaux étaient mieux reconnus après un délai long qu'après un délai court, suggérant que les émotions musicales, notamment la valence positive, permettraient de renforcer la consolidation mnésique. En revanche, aucun effet principal de l'arousal, ni d'interaction avec la valence n'ont été retrouvés. Ensuite, des données auprès de participants contrôles ont été recueillies dans l'Article III (Nineuil et al., en préparation). Dans cet article, le paradigme de l'Article I a été repris tout en modifiant les consignes lors de l'encodage et le matériel musical utilisé. Ainsi, des effets indépendants de l'arousal et de la valence émotionnelle ont été retrouvés : les participants ont mieux reconnu les extraits musicaux d'arousal élevé que ceux d'arousal faible

et les extraits de valence positive que ceux de valence négative. En revanche, il n'a été retrouvé ni d'interaction entre l'arousal et la valence émotionnelle, ni d'effet du délai.

Alors que dans l'Article I une augmentation des performances de reconnaissance des extraits musicaux a été retrouvée après un délai de 24 heures suggérant que les émotions musicales, notamment la valence positive, permettent de renforcer la consolidation mnésique, aucun effet significatif du délai n'a été retrouvé dans l'Article III. Les effets distincts des deux dimensions émotionnelles étaient retrouvés quel que soit le délai, suggérant que les émotions musicales n'avaient pas d'effet sur le processus de consolidation mnésique. Tous les changements (voir **Table 13**) au niveau du style musical (i.e., musique de film), du type d'apprentissage (i.e, apprentissage incident) et de la nature de l'encodage (i.e, encodage profond) sont autant de facteurs qui pourraient expliquer cette absence d'effet du délai dans la dernière étude. En effet, lors de la phase d'encodage, alors qu'aucune tâche n'était demandée aux participants dans l'Article I, dans l'Article III les participants devaient réaliser une tâche de jugement émotionnel après chaque écoute. Comme le développent Halpern & Müllensiefen (2008), un jugement émotionnel induirait un traitement profond de l'information. Or, selon la théorie de la profondeur du traitement de l'information développée par Craik & Lockhart (1972), un encodage profond (i.e., *deep encoding*) amènerait à des meilleures performances de mémoire qu'un encodage superficiel (i.e., *shallow encoding*). Les jugements émotionnels lors de l'encodage ont pu avoir comme effet d'augmenter les performances mnésiques dans l'Article III. En effet, le score moyen de reconnaissance obtenu dans l'Article III (i.e., aire moyenne sous la courbe ROC = 0.90) était supérieur à celui obtenu dans l'Article I (i.e., aire moyenne sous la courbe ROC = 0.81). Ces résultats confirmeraient que les changements méthodologiques entre les deux études ont modifié le niveau de difficulté entre les deux tâches ; le niveau de difficulté de la tâche dans l'Article III paraîtrait plus faible que celui de l'Article I. Ensuite, dans l'Article III, des extraits de musiques de film capables de provoquer très rapidement de fortes émotions (i.e., après deux secondes environ), comme cela a été montré par l'étude physiologique de Fuentes-Sánchez, Pastor, Escrig, et al. (2021), ont été utilisés. De plus, la tâche de jugement émotionnel lors de la phase d'encodage, en plus de modifier le niveau de profondeur du traitement, a également pu augmenter l'effet des émotions sur la mémoire. En effet, il a été montré dans la littérature que, lorsque les participants concentrent leur attention sur l'émotion générée par les stimuli, leur traitement et leurs performances mnésiques peuvent en être affectés (Everaert et al., 2011 ; Greenberg et al., 2012). A cela s'ajoute également l'encodage de type incident qui favoriserait les effets des émotions sur la mémoire (Li et al.,

2018). Tous ces éléments pourraient expliquer pourquoi les effets des émotions musicales se sont manifestés très rapidement après la phase d'encodage et ont donc influencé les performances dès le délai court, effets qui ont ensuite persisté après un délai long. En accord avec ces arguments, les performances de reconnaissance des participants contrôles après un délai court dans l'Article III (i.e., aire moyenne sous la courbe ROC après un délai court = 0.89) étaient supérieures à celles obtenues par les participants de l'Article I (i.e., aire moyenne sous la courbe ROC après un délai court = 0.76). Dès le délai court les performances dans l'Article III étant plus élevées, l'amplitude d'augmentation avec le délai était alors plus faible. Ainsi, les changements méthodologiques réalisés dans l'Article III auraient vraisemblablement impacté les performances mnésiques en augmentant les effets des dimensions émotionnelles sur la mémoire, comme cela était attendu, mais ont au contraire pu diminuer leurs effets sur le processus de consolidation.

**Table 13.**

Comparaison des procédures utilisées dans l'Article I et l'Article III

|                                     | Article I              | Article III                      |
|-------------------------------------|------------------------|----------------------------------|
|                                     | (Nineuil et al., 2020) | (Nineuil et al., en préparation) |
| Condition de passation              | En face-à-face         | En ligne (téléconsultation)      |
| Matériel musical                    | Extraits de symphonies | Extraits de musiques de film     |
| Type d'apprentissage                | Intentionnel           | Incident                         |
| Nature de l'encodage                | Superficiel            | Profond                          |
| Nombres de présentation des stimuli | 3 écoutes              | 3 écoutes                        |
| Délai court                         | 15 minutes             | 15 minutes                       |
| Délai long                          | 24 heures              | 24 heures                        |

Les résultats de l'Article I suggèrent que les émotions musicales, notamment la valence positive, permettent de renforcer la consolidation mnésique. Ce bénéfice de la valence positive sur la mémoire musicale après un délai long, également retrouvé par Eschrich et al. (2005, 2008), est en opposition avec le biais de négativité majoritairement rapporté dans le domaine non musical (pour revue, Kensinger, 2007). Une des hypothèses pouvant expliquer ce biais de positivité est le plus grand plaisir que pourraient éprouver les auditeurs à écouter de la musique

de valence positive par rapport à la musique de valence négative. En effet, selon l'étude de Ferreri & Rodriguez-Fornells (2017) ce serait le plaisir procuré par l'écoute musicale plutôt que les dimensions émotionnelles qui améliorerait la mémoire musicale, les extraits musicaux évalués comme très agréables étant mieux reconnus que ceux évalués comme moins agréables. Il est vrai que la musique, de par le plaisir qu'elle peut engendrer, activerait le circuit cérébral de la récompense (Blood & Zatorre, 2001 ; Gold et al., 2019 ; Salimpoor et al., 2011, 2013). Ainsi, la musique, via l'activation du système de récompense, pourrait déclencher une libération de neurotransmetteurs dont la dopamine qui pourrait améliorer l'encodage des informations en mémoire (Ferreri & Rodriguez-Fornells, 2022 ; Ripollés et al., 2016, 2018). Pour vérifier cette hypothèse, nous avons évalué, à titre exploratoire, l'effet du plaisir musical sur la mémoire des participants dans l'Article III. Aucun lien significatif n'a été retrouvé entre les jugements de plaisir et les performances de reconnaissance. Cette absence d'effet peut en partie être attribuée à la faible variabilité des niveaux de plaisir généré par les extraits de notre étude qui étaient globalement considérés comme plaisants voire très plaisants. En effet, la moyenne des jugements de plaisir des extraits étant rarement au-dessous de trois sur une échelle en cinq points (i.e., niveau médian de plaisir). Tous les extraits étaient donc jugés en moyenne comme plaisants voire très plaisants, ce qui pourrait expliquer pourquoi aucun effet du plaisir n'a été retrouvé sur les performances de reconnaissance dans notre étude. Nous pouvons supposer qu'un effet du niveau de plaisir sur les performances de reconnaissance aurait pu être retrouvé si des extraits musicaux plus déplaisants avaient été utilisés. A l'inverse, dans l'étude de Ferreri & Rodriguez-Fornells (2017), un effet du plaisir musical a été retrouvé sur les performances de reconnaissance mais aucun effet de l'arousal ou de la valence émotionnelle. Comme le suggèrent les auteurs, le paradigme de leur étude n'a pas été créé pour étudier les dimensions émotionnelles, mais plutôt les composantes de plaisir et de récompense tout en contrôlant les dimensions émotionnelles. Les extraits musicaux de l'étude de Ferreri & Rodriguez-Fornells (2017) n'ayant pas été choisis selon les dimensions émotionnelles, une trop faible variabilité des niveaux d'arousal et de valence pourrait ainsi expliquer leur absence d'effet sur les performances de reconnaissance. De la même manière pour notre étude, les stimuli n'ont pas été sélectionnés pour induire différents niveaux de plaisir, cela empêchant d'en distinguer l'effet sur la mémoire. Cependant, nous ne pouvons pas exclure la possibilité que les extraits musicaux, en ayant été jugés majoritairement comme plaisants voire très plaisants, ont tous bénéficié d'une amélioration en mémoire grâce au plaisir qu'ils génèrent chez les auditeurs. Afin d'éclaircir les effets conjoints et/ou distincts de ces différents facteurs,

de futures études utilisant un matériel musical dont les niveaux d'arousal, de valence émotionnelle et de plaisir musical seront nécessaires. Enfin, une autre hypothèse pouvant s'ajouter à celle du plaisir musical afin d'expliquer le bénéfice de la valence positive sur la mémoire est l'existence d'un biais attentionnel au profit de ces stimuli. En effet, le niveau de biais attentionnel pour les stimuli de valence positive par rapport à des stimuli neutres varierait en fonction du niveau d'arousal, mais surtout en fonction de la pertinence (*goal relevance*) par rapport à des besoins spécifiques (e.g., la faim) (Pool et al., 2016). Le niveau d'attention porté aux stimuli jugés pertinents serait plus important que celui porté aux stimuli jugés non pertinents et ils seraient ainsi mieux mémorisés (Montagrin et al., 2013). Nous pouvons donc nous demander si les extraits musicaux de valence positive n'ont pas été considérés comme plus pertinents, du fait de leur capacité à induire chez les participants un sentiment de plaisir supérieur à celui induit à l'écoute d'extraits de valence négative. A notre connaissance, cette théorie de la pertinence n'a pas été testée avec un matériel musical. De futures études pourront tenter d'adapter les paradigmes utilisés dans ce domaine afin d'évaluer si un tel phénomène impacte également la mémoire musicale.

Alors qu'aucun effet de l'arousal n'a été retrouvé dans l'Article I, un bénéfice de l'arousal élevé sur la mémoire a été retrouvé dans l'Article III. Comme développé précédemment, ces divergences de résultats pourraient être expliquées par les différences méthodologiques entre ces deux études dont le type de matériel musical utilisé. En effet, les extraits musicaux utilisés dans l'Article I ont été empruntés à l'étude d'Alonso et al. (2015). Ce matériel était composé d'extraits de musiques de style classique, écrites par des compositeurs entre 1830 et 1954, sélectionnées afin de disposer de stimuli musicaux homogènes entre les combinaisons émotionnelles. Toutefois, ce style de musique pourrait évoquer des émotions moins intenses en terme d'arousal que d'autres styles tels que le jazz ou la pop, plus écoutés et entendus de nos jours. Pour ces raisons, dans l'Article III, il a été choisi d'utiliser des extraits de musique de film, style musical connu pour déclencher de fortes émotions (Cohen, 2011 ; Fuentes-Sánchez, Pastor, Escrig, et al., 2021). Néanmoins, le style de musique à utiliser afin d'étudier au mieux les effets des émotions musicales ne fait pas l'objet d'un consensus. Plusieurs études ont eu recours à des extraits de musiques classiques (Alonso et al., 2015 ; Eschrich et al., 2005 ; Ferreri & Rodriguez-Fornells, 2017), d'autres ont utilisé des extraits de musiques de film (Altenmüller et al., 2014 ; Eschrich et al., 2008) et enfin des études ont eu recours à des musiques composées par ordinateur selon le style de musique de film (Aubé et al., 2013 ; Narme et al., 2016 ; Samson et al., 2009 ; Vieillard & Gilet, 2013).

Les différents styles de musique utilisés pourraient être un des facteurs expliquant les différences de résultats entre ces études. Afin de pouvoir dissocier les effets du matériel par rapport aux effets des consignes d'encodage, il apparaît nécessaire de reprendre le paradigme utilisé dans l'Article I avec le matériel musical de l'Article III. Au final, du fait des différents changements méthodologiques, l'Article III a révélé de meilleures performances de reconnaissance des extraits musicaux d'arousal élevé par rapport à ceux d'arousal faible quel que soit le délai. Un tel bénéfice de l'arousal élevé sur la mémoire est retrouvé dans de nombreuses études dans le domaine non musical (Bradley et al., 1992, 2001 ; Cahill et al., 1995 ; Ochsner, 2000 ; Wagner et al., 2006 ; pour revue, Hamann, 2001) et dans le domaine musical (Alonso et al., 2015; Eschrich et al., 2005). Que les performances soient testées immédiatement après la phase d'encodage ou après un délai plus long, le réhaussement émotionnel de la mémoire serait toujours en faveur des stimuli d'arousal élevé (Bradley et al., 1992 ; Cahill & McGaugh, 1995; Ochsner, 2000 ; Wagner et al., 2006) conformément à nos résultats. Cependant, contrairement à d'autres études réalisées avec un matériel non musical, nous n'avons pas réussi à montrer que le délai renforcerait l'effet de l'arousal sur la mémoire (LaBar & Phelps, 1998 ; McGaugh, 2018). De nouveau, nous pouvons nous demander si les changements méthodologiques réalisés entre l'Article III, en accentuant les effets des dimensions émotionnelles, notamment d'arousal, très rapidement après la phase d'encodage, n'auraient pas fait diminuer les effets de ces dimensions sur le processus de consolidation.

Dans les Articles I et III, seuls des effets distincts de l'arousal et de la valence émotionnelle sur la mémoire ont été retrouvés. Pourtant, l'étude d'Alonso et al. (2015) qui a testé la mémoire musicale en faisant varier, en plus des dimensions émotionnelles, le délai de rétention, avait retrouvé une interaction entre ces deux dimensions dans la condition immédiate. Dans cette étude, une tâche de reconnaissance était réalisée immédiatement après la tâche d'encodage, puis de nouveau après un délai de 24 heures. Dans la condition immédiate, l'effet de la valence variait en fonction de l'arousal : alors que la valence n'influçait pas la mémoire des extraits d'arousal élevé, elle modulait la reconnaissance des extraits d'arousal faible, les extraits de valence positive étant mieux reconnus que ceux de valence négative. En revanche, après un délai de 24 heures, seuls des effets indépendants de l'arousal et de la valence émotionnelle ont été mis en évidence. Ce résultat est cohérent avec ceux retrouvés dans le domaine non musical. En effet, seules les études testant les performances de reconnaissance après un délai court retrouvaient une interaction entre les dimensions émotionnelles (Gomes et al., 2013 ; Kensinger, 2008 ; Li et al., 2018 ; Waring & Kensinger, 2009, 2011) alors que des

effets indépendants étaient retrouvés après un délai plus long (Comblain et al., 2004 ; Mickley Steinmetz & Kensinger, 2009 ; Ochsner, 2000 ; Waring & Kensinger, 2009). En nous basant sur les données de la littérature, nous nous attendions à retrouver une interaction entre l'arousal et la valence émotionnelle après un délai court. Afin de tester l'effet du délai de rétention sur les performances mnésiques tout en gardant un nombre d'écoute constant, ce qui n'est pas le cas dans l'étude d'Alonso et al. (2015) dans laquelle la reconnaissance après un délai de 24 heures a bénéficié d'une présentation additionnelle, nous avons adapté le paradigme expérimental de Waring & Kensinger (2009). Ainsi, la phase d'encodage a été répartie sur deux jours consécutifs avec huit stimuli présentés le premier jour et huit autres stimuli présentés le second jour. Un seul test de reconnaissance a été réalisé le jour 2 lors duquel les 16 stimuli cibles étaient mélangés à 16 distracteurs. Ainsi, seuls huit stimuli par condition devaient être mémorisés contre 16 dans l'étude d'Alonso et al. (2015). Ce nombre de stimuli reste faible par rapport aux 25 à 75 stimuli présentés dans les études dans le domaine non musical ayant retrouvé une interaction entre les dimensions émotionnelles. De ce fait, un nombre plus petit de stimuli pour chaque condition a pu diminuer la difficulté de la tâche. Nous pouvons supposer qu'une interaction entre les dimensions émotionnelles pourrait être retrouvée lorsque le niveau de difficulté de la tâche est plus élevé.

En conclusion, seul un effet de la valence (Article I) ou des effets distincts des dimensions émotionnelles (Article III) ont été révélés dans nos travaux. Un effet bénéfique de la valence positive sur la mémoire musicale (Article III) et notamment sur le processus de consolidation (Article I) a été retrouvé. En revanche, selon le paradigme utilisé, l'effet de l'arousal élevé sur la mémoire n'a pas toujours été mis en évidence. De plus, contrairement à nos attentes, cette dimension émotionnelle n'a pas eu d'impact sur le processus de consolidation mnésique. En revanche, après un délai de 24 heures, nous avons retrouvé que les performances de reconnaissance musicale seraient stables (Article III) voire améliorées par rapport à la reconnaissance après un délai de 15 minutes (Article I). Plusieurs hypothèses ont été formulées afin de tenter d'expliquer l'absence d'effet des dimensions émotionnelles sur le processus mnésique dans l'Article III alors que l'Article I avait suggéré que les émotions musicales, notamment la valence positive, permettraient de renforcer la consolidation mnésique. De futures études devront continuer d'explorer l'impact des dimensions émotionnelles sur la mémoire musicale et notamment le processus mnésique afin de confirmer ces résultats prometteurs.

## 2. L'impact de l'arousal et de la valence sur la mémoire musicale d'une population clinique avec une lésion du lobe temporal médian

Afin de comprendre l'implication du LTM, et plus précisément de l'amygdale et de l'hippocampe, dans l'impact des dimensions émotionnelles sur la mémoire, nous avons étudié les performances de reconnaissance musicale de patients ayant bénéficié d'une résection du LTM gauche ou droit par comparaison à des adultes sains (l'Article III ; Nineuil et al., en préparation).

Nos résultats ont révélé que les patients ont, comme les participants contrôles, mieux reconnu les extraits musicaux de valence positive que ceux de valence négative. Dans le domaine non musical, plusieurs études ont retrouvé un effet de la valence, le plus souvent de la valence négative, sur la mémoire des patients ayant bénéficié d'une résection du lobe temporal (Buchanan et al., 2001 ; Phelps et al., 1997 ; Pouliot & Jones-Gotman, 2008). En effet, le traitement de la valence émotionnelle reposerait en grande partie sur le cortex orbito-frontal (Anderson et al., 2003 ; Gläscher & Adolphs, 2003 ; Kensinger & Corkin, 2004 ; Small et al., 2003). Alors qu'avant la chirurgie de l'épilepsie, l'activité épileptogène générée par le LTM pourrait se diffuser au niveau du cortex frontal et donc perturber le traitement de la valence émotionnelle, après la chirurgie de l'épilepsie et la disparition des crises, cette zone serait désengagée de la zone épileptogène. C'est pourquoi un effet de la valence émotionnelle sur les performances mnésiques des patients est attendu malgré leur lésion du LTM. De plus, l'effet bénéfique de la valence positive, contrairement au biais de négativité également décrit dans cette population clinique (Buchanan et al., 2001 ; Pouliot & Jones-Gotman, 2008), pourrait également s'expliquer par le plaisir musical généré par les extraits de valence positive. En effet, les jugements de plaisir des patients ne différaient pas de ceux de participants contrôles ; ils ont également jugé tous les extraits comme plaisants voire très plaisants en moyenne. Les patients ont donc également pu bénéficier de l'effet du plaisir musical de manière combinée à la valence émotionnelle sur leur mémoire musicale. Ainsi, l'hypothèse selon laquelle le plaisir musical peut améliorer les performances mnésiques est une perspective à investiguer chez les patients présentant une lésion du LTM dont les troubles mnésiques sont largement reconnus (Tramoni-Negre et al., 2017). Malgré une lésion du LTM, l'effet de la valence émotionnelle et notamment de la valence positive sur la mémoire musicale est retrouvé. Ces résultats sont en accord avec les données de neuroimagerie révélant que cette dimension serait prise en charge par d'autres zones cérébrales non lésées chez ces patients.

La dimension émotionnelle d'arousal dépendrait en grande partie de l'amygdale (Anderson et al., 2003 ; Gläscher & Adolphs, 2003 ; Kensinger & Corkin, 2004 ; Small et al., 2003). Du fait de la résection de cette structure chez notre population d'intérêt et qu'une majorité d'études ait montré une diminution voire une absence d'effet de l'arousal sur leurs performances mnésiques (Åhs et al., 2010 ; Pouliot & Jones-Gotman, 2008), un effet moindre de l'arousal sur la mémoire musicale était attendu chez les patients. Pourtant, nos résultats ont montré que les patients ont bénéficié, comme les participants contrôles, d'un effet de l'arousal élevé sur leur mémoire. Étant donné que la lésion était unilatérale, il se pourrait que la réserve fonctionnelle des régions contralatérales à la lésion ait permis de compenser un éventuel déficit. En effet, l'encodage de stimuli émotionnels serait associé à des activations cérébrales bilatérales des amygdales (voir méta-analyse, Murty et al., 2010). Si tel est le cas, il se pourrait que l'intégrité de l'amygdale contralésionnelle suffise au bon fonctionnement de la mémoire émotionnelle. Cependant, une telle interprétation ne semble pas compatible en l'état avec la littérature précédemment rapportée (Åhs et al., 2010 ; Pouliot & Jones-Gotman, 2008). Il est alors à noter que ces études utilisaient des odeurs ou des images et non des extraits musicaux. Ces résultats pourraient donc laisser penser que la musique serait capable de générer des émotions plus intenses ou excitantes qui pourraient moduler les performances mnésiques des patients malgré leurs lésions. En effet, le traitement des émotions musicales impliquerait un large réseau cortical et sous-cortical (Koelsch, 2018, 2020 ; Trost et al., 2012 ; Vuilleumier & Trost, 2015). De ce fait nous pouvons également imaginer qu'une autre région, péri-lésionnelle ou non, a pu compenser la lésion unilatérale de l'amygdale. Ces données révèlent une nouvelle fois l'intérêt de l'utilisation du matériel musical afin d'investiguer les structures sur lesquelles reposent la mémoire émotionnelle.

Il faut noter que lors de la phase d'encodage, il a été demandé aux patients de juger l'arousal et la valence des stimuli afin d'écarter la présence d'éventuels troubles émotionnels pouvant impacter leurs performances de mémoire musicale. Aucune différence de jugement d'arousal n'a été observée entre les patients et les participants contrôles. La littérature concernant la présence d'un déficit du jugement de l'arousal dans le domaine musical n'est pas consensuelle, certaines études le retrouvant (Gosselin et al., 2005 ; Khalfa, Guye, et al., 2008) mais d'autres pas (Dellacherie, Bigand, et al., 2011 ; Khalfa, Delbe, et al., 2008). Cette divergence de résultats pourrait être liée en partie à la durée des extraits musicaux. En effet, les extraits utilisés dans les études ne retrouvant pas de déficit sont plus longs (i.e., 15 à 20 secondes ; Khalfa, Delbe, et al., 2008) que ceux des études montrant un déficit (i.e., 7 à 9

secondes ; Gosselin et al., 2005 ; Khalfa, Guye, et al., 2008). Or, lorsque les extraits sont plus longs, ils présentent plus d'indices acoustiques permettant d'identifier plus facilement l'émotion générée. Concernant la valence émotionnelle, plusieurs études n'ont pas retrouvé de différence entre les jugements de valence émotionnelle des patients présentant une lésion du LTM droit et des participants contrôles (Dellacherie, Bigand, et al., 2011 ; Gosselin et al., 2005 ; Khalfa, Delbe, et al., 2008). Dans l'Article III, les patients présentant une lésion du LTM gauche jugeaient la valence des extraits musicaux de la même manière que les participants contrôles. En revanche, les patients présentant une lésion à droite jugeaient les extraits de valence négative plus positivement que les participants contrôles. Ce résultat contradictoire par rapport à la littérature nécessiterait d'être confirmé auprès d'un plus grand échantillon de participants. Malgré cette altération du jugement, les dimensions émotionnelles, dont la valence, ont modulé les performances mnésiques de ces patients. Ces résultats suggèrent une dissociation entre les capacités de jugement émotionnel et celles de la mémoire émotionnelle, dissociation déjà rapportée dans des études portant sur la mémoire verbale, visuelle ou olfactive (Adolphs, 2000 ; Buchanan et al., 2001 ; LaBar & Phelps, 1998 ; Phelps et al., 1997 ; Pouliot & Jones-Gotman, 2008).

Bien que l'influence des dimensions émotionnelles sur les performances mnésiques ait été mise en évidence chez les patients comme les participants contrôles, la mémoire musicale des patients selon la latéralisation de la lésion était différemment affectée par le délai. Les patients présentant une lésion du LTM gauche étaient déficitaires par rapport aux participants contrôles quel que soit le délai, alors que les patients présentant une lésion du LTM droit étaient déficitaires seulement après le délai de 24 heures. Alors que le rôle du lobe temporal droit dans le traitement musical et dans la mémoire musicale a été décrit de nombreuses fois (Samson, 1999 ; Watanabe et al., 2008), ce ne sont pas les patients présentant une lésion à droite qui présentent un déficit de reconnaissance dès le délai court mais les patients avec une lésion à gauche. Ce résultat ne semble pas s'expliquer par une organisation cérébrale différente ou par une variable démographique (i.e., âge, sexe, éducation, quotient intellectuel, expertise musicale, hédonisme musical) ou clinique (i.e., humeur, âge du début de l'épilepsie, durée de la maladie, délai depuis la chirurgie, volume de la résection) puisque les groupes de patients étaient équivalents sur tous ces éléments. Seul le nombre de médicaments antiépileptiques différaient entre les groupes de patients, sans qu'aucun effet de cette variable n'ait été trouvé sur les performances de reconnaissance des patients. Cependant, au vu de notre faible effectif, il est prématuré d'écarter une possible influence de ces facteurs sur les performances de

reconnaissance musicale. De plus, de précédentes études avaient déjà noté une perte plus marquée de l'effet des émotions sur la mémoire chez les patients présentant une lésion du LTM gauche (Buchanan et al., 2001 ; Carvajal et al., 2020 ; Frank & Tomaz, 2003 ; Phelps et al., 1997). Ces résultats pourraient suggérer une contribution plus importante du lobe temporal gauche dans la mémoire émotionnelle mais cette hypothèse reste à confirmer. Ensuite, les patients présentant une lésion du LTM droit étaient déficitaires par rapport aux participants contrôles seulement après le délai long. Ce résultat est cohérent avec l'étude de Samson & Zatorre (1992), ne prenant pas en compte la dimension émotionnelle de la musique, mais ayant relevé un défaut de consolidation en mémoire musicale chez ces patients. Enfin, alors qu'un oubli accéléré (i.e., diminution plus marquée des performances mnésiques avec le délai que chez les adultes sains) est souvent retrouvé chez cette population clinique (Mameniškienė et al., 2020 ; Narayanan et al., 2012 ; Tramoni et al., 2011), aucune différence significative entre les deux délais n'a été retrouvée dans notre tâche. Deux explications peuvent être apportées à cette observation. Soit l'absence de significativité est liée à notre effectif ( $n = 30$  patients), soit les émotions générées par les extraits musicaux ont permis de limiter le phénomène d'oubli. En effet, nous pouvons supposer que, si nous avions présenté un matériel neutre dans les mêmes conditions, les performances auraient été plus faibles et significativement diminuées avec le délai. Cependant, il apparaît complexe de trouver des musiques neutres, contrairement aux informations verbales ou visuelles. En effet, la musique, étant définie comme le langage de l'émotion, elle est rarement perçue comme non émotionnelle. Dans l'étude de Dellacherie et al. (2008) le concept de musique "ambiguë" plutôt que de musique "neutre" a été proposé. Ces musiques ambiguës correspondent aux musiques dont les indices émotionnels sont insuffisants pour évoquer une émotion spécifique. Néanmoins l'identification de musiques émotionnellement neutres n'est pas impossible. Par exemple, l'étude de Dellacherie et al. (2011) a réussi à identifier des musiques présentant des valeurs intermédiaires d'arousal et de valence émotionnelle. Il est à noter que la majorité des résultats dans le domaine non musical a mis en avant l'impact des émotions sur la mémoire grâce à la comparaison de la mémorisation d'un matériel neutre à celle d'un matériel émotionnel (e.g., Hamann et al., 1999 ; Inaba et al., 2005 ; Kensinger, 2008 ; Kensinger & Corkin, 2004 ; Li et al., 2018 ; Mickley Steinmetz & Kensinger, 2009 ; Pierce & Kensinger, 2011 ; Sharot & Phelps, 2004 ; Sharot & Yonelinas, 2008 ; Talmi et al., 2007). De futures études devront donc se consacrer à la validation d'un matériel musical neutre pour comparer, à l'instar des études dans le domaine non musical, les

capacités de mémoire d'un matériel musical neutre et d'un matériel musical émotionnel afin de mettre en avant les potentiels avantages de la mémoire musicale émotionnelle.

Afin d'évaluer si la mémoire musicale des patients ayant bénéficié d'une résection du LTM différait de la mémoire non musicale, leurs performances obtenues à la tâche de reconnaissance musicale ont été comparées à celles obtenues aux tâches de reconnaissance verbale et non verbale réalisées au cours du bilan neuropsychologique. Afin de permettre cette comparaison, les scores obtenus aux différentes tâches de mémoire ont été transformés en note Z. Ainsi, après un délai de 15 minutes, les patients obtenaient de meilleures performances à la tâche de reconnaissance musicale qu'aux tâches de reconnaissance verbale (i.e., Rey Auditory Verbal Learning test ; Schmidt, 1996) ou visuelle (i.e., Abstract words Learning test ; Jones-Gotman, 1997). La mémoire musicale, après un délai court, semblerait donc plus robuste que la mémoire visuelle chez les patients présentant une lésion du LTM droit et que la mémoire verbale chez les patients présentant une lésion du LTM gauche. Ce résultat peut s'expliquer par l'implication dans la mémoire musicale de régions controlatérales du LTM et/ou d'autres régions du cortex temporal non touchées par la résection qui seraient encore fonctionnelles. Cependant, d'autres facteurs comme la durée de présentation des stimuli (i.e., durée de l'extrait de 15 secondes vs. présentation des mots ou des images allant jusqu'à trois secondes en moyenne), la caractéristique dynamique de la musique ou encore la différence de nombre d'items à mémoriser (i.e., huit items à mémoriser après un délai court vs. 15 items dans les tests neuropsychologiques) peuvent également avoir participé à la supériorité des performances de mémoire musicale. En revanche, après un délai long, les performances avec le matériel musical ne différaient plus de celles avec un matériel verbal (i.e., *Aggie Figures Learning Test* ; Majdan et al., 1996). Ce dernier résultat suggère que la présence d'une lésion du LTM droit ou gauche affecterait la mise en mémoire à plus long terme des informations qu'elles soient musicales ou verbales. La mémoire musicale à plus long terme, malgré sa dimension émotionnelle, serait donc également touchée lors d'une lésion du LTM.

En conclusion, nos résultats montrent que, malgré une lésion du LTM, les patients ont bénéficié des mêmes effets des dimensions émotionnelles sur leur mémoire que les participants contrôles. Conformément à ce qui était attendu, un effet de la valence émotionnelle et plus précisément de la valence positive a été retrouvé. Contrairement aux données dans le domaine non musical, un effet de l'arousal élevé a également été relevé, suggérant que la musique serait capable de générer des émotions plus intenses ou excitantes qui pourraient moduler les

performances mnésiques des patients malgré leurs lésions. Enfin, après un délai court, la mémoire musicale de ces patients semble être moins déficitaire que leur mémoire pour des stimuli verbaux ou visuels non émotionnels. Les émotions musicales permettraient donc, au moins après un délai court, de renforcer la mémoire musicale malgré les troubles de mémoire retrouvés dans cette population clinique. De futures études devront continuer à investiguer l'impact des émotions musicales sur la mémoire après des délais plus longs en comparant, par exemple, la mémoire de stimuli musicaux émotionnels à celle de stimuli neutres afin de confirmer ou non les bénéfices des émotions musicales à long terme.

### 3. Perspectives

Ce travail de thèse s'est concentré sur la composante émotionnelle de la musique, cependant nous ne pouvons pas mettre de côté les autres caractéristiques musicales pouvant contribuer aux émotions et à la mémoire musicale. Par exemple, des variations de timbre ou de tempo moduleraient également la mémoire musicale (Halpern & Müllensiefen, 2008). Les extraits musicaux utilisés dans l'Article I, issus de l'étude d'Alonso et al. (2015), présentent l'avantage d'être très homogènes en termes de rythme, de mode et de tempo du fait qu'ils proviennent tous de symphonies du même style et de la même période. En revanche, les extraits de musique de films utilisés dans l'Article III présentent des caractéristiques musicales diversifiées, ce qui leur permet d'ailleurs de générer des émotions fortes et variées. Ainsi, nous ne pouvons pas exclure le potentiel impact des caractéristiques musicales qui ont pu contribuer de manière distincte ou complémentaire aux effets propres des émotions sur la mémoire. De plus, afin d'étudier l'impact des émotions musicales sur la mémoire, nous avons choisi de nous référer à l'approche dimensionnelle à deux dimensions : l'arousal et la valence émotionnelle (Russell, 1980). Cependant, même si des études suggèrent que l'utilisation de deux dimensions serait suffisante pour représenter les émotions musicales perçues (Eerola & Vuoskoski, 2011 ; Fuentes-Sánchez, Pastor, Eerola, et al., 2021), il serait nécessaire de tester si les autres dimensions développées dans la littérature (Cowen et al., 2020 ; Schimmack & Grob, 2000) n'affecteraient pas également les performances mnésiques. De futures études devront investiguer tour à tour ces différentes caractéristiques intrinsèques au matériel et émotionnelles, faisant sa particularité, afin d'approfondir nos connaissances sur la mémoire musicale.

Du fait de la situation sanitaire liée à la COVID-19 ainsi que dans le but d'augmenter la puissance statistique, ce qui nécessite des échantillons plus grands de participants, les chercheurs seront de plus en plus souvent amenés à réaliser des tâches en distanciel (Papatzikis

et al., 2020 ; Sassenberg & Ditrich, 2019). Dans notre travail de thèse, l'**Article II** (Nineuil et al., 2022) a été réalisé en ligne et l'Article III en téléconsultation. Dans le premier cas les participants réalisaient en autonomie la tâche alors que dans le second l'expérimentateur gardait un contact permanent avec le participant grâce à la visioconférence. Nos résultats ont révélé que les jugements obtenus lors de la passation en ligne (Article II, Nineuil et al., 2022) étaient similaires à ceux obtenus par les deux précédentes études réalisant les passations en laboratoire (Eerola & Vuoskoski, 2011 ; Fuentes-Sánchez, Pastor, Eerola, et al., 2021). Les jugements émotionnels d'une série d'extraits musicaux tel que le *Film Music Stimuli Set* resteraient donc stables, que les jugements soient réalisés en face-à-face ou non. Ensuite, grâce aux passations réalisées avant la pandémie du COVID-19, nous avons pu comparer les performances des participants contrôles ayant réalisé la tâche en présentiel par rapport à ceux l'ayant réalisée en téléconsultation (Article III). Les résultats n'ont montré aucune différence de performances. Ce résultat est cohérent avec les nombreuses études soutenant l'idée que les performances cognitives ne diffèrent pas entre la condition de téléconsultation et la condition en présentiel (pour revue, Brearly et al., 2017). Ainsi, ces résultats, montrant que les jugements émotionnels et la mémoire musicale ne seraient que peu influencés par l'environnement (i.e., face-à-face ou distanciel), sont encourageants pour le développement de la recherche en ligne dans le domaine musical.

Étant donné que le recrutement des patients dans nos études a été interrompu durant les périodes de confinement causées par la pandémie de COVID-19, nous avons réalisé une étude à partir d'une base de données disponible à l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière (Paris). Ce travail a permis d'examiner la question du traitement émotionnel chez les patients présentant une épilepsie du lobe temporal sous un angle différent. Ainsi, dans l'**Article IV** (Nineuil et al., soumis), nous avons comparé l'impact de l'intensité émotionnelle sur la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles (EFE) entre les patients et des participants sains. Nous avons également étudié l'effet de la localisation et de la latéralisation du foyer épileptique sur la reconnaissance des EFE chez des patients présentant une épilepsie du lobe temporal médian associée ou non à une sclérose hippocampique, ou une épilepsie du lobe temporal latéral. Cette étude n'a révélé aucune différence selon la latéralisation de l'épilepsie, suggérant que les capacités de reconnaissance des EFE reposent sur des fonctions cérébrales représentées bilatéralement. Cependant, des différences de performances selon la catégorie émotionnelle et le niveau d'intensité de l'EFE ont été retrouvées en fonction de la localisation du foyer épileptique. Alors que de nombreuses études dans le domaine musical prennent en compte la

latéralisation de la lésion épileptique, aucune étude, à notre connaissance, n'a pris en compte la localisation du foyer épileptique. Or, compte tenu des résultats de l'Article IV, nous pouvons supposer que les traitements émotionnels et la mémoire émotionnelle pourraient être différemment impactés en fonction des zones du lobe temporal touchées. De même, des différences de performance pourraient être retrouvées selon les différents types de chirurgie de l'épilepsie, les tissus réséqués ou encore l'approche chirurgicale utilisée pour la résection. Les futures études devront prendre en compte ces différents facteurs liés aux caractéristiques de l'épilepsie et de la chirurgie afin d'approfondir nos connaissances sur l'implication des différentes zones du lobe temporal dans le traitement émotionnel et la mémoire musicale.

Nos résultats suggèrent que les émotions peuvent améliorer, au moins sur des courts délais, la mémoire musicale des patients présentant une lésion du LTM. Cela en démontre un intérêt clinique important. Malheureusement, les études ayant évalué les effets d'une prise en charge musicale auprès d'une population de patients épileptiques sont rares. Pourtant ce type de prise en charge a déjà fait ses preuves auprès de patients présentant une maladie neurodégénérative (pour revue, Lam et *al.*, 2020). À ce jour, les prises en charge musicale auprès de patients épileptiques ont principalement pour objectif de diminuer le nombre de crises d'épilepsie (pour revue, Alqahtani et *al.*, 2020). A notre connaissance, aucune étude n'a testé l'efficacité d'une prise en charge musicale sur les troubles cognitifs auprès de cette population. De plus, le bénéfice d'un contexte musical sur l'apprentissage verbal a été récemment montré (Cardona et *al.*, 2020) mais reste trop peu exploré notamment auprès des populations cliniques (pour revue, Ferreri & Verga, 2016). Si la musique est capable de générer des émotions chez les patients présentant une lésion du LTM et que la mémoire de ce matériel est renforcée au moins pendant de courts délais, nous pouvons supposer que la mémoire d'informations verbales encodées en musique pourrait également en être renforcée.

En conclusion, ce travail de thèse avait pour objectif d'évaluer l'impact de l'arousal et de la valence émotionnelle sur la mémoire musicale et d'améliorer nos connaissances sur le rôle du LTM dans le processus de consolidation des informations musicales. Grâce à l'étude de patients ayant bénéficié d'une résection du LTM, incluant l'amygdale et l'hippocampe, nous avons pu révéler que les effets de l'arousal et de la valence émotionnelle sur la mémoire musicale étaient préservés. Les émotions musicales, reposant sur un large réseau cortical et sous-cortical (Koelsch, 2018, 2020 ; Trost et *al.*, 2012 ; Vuilleumier & Trost, 2015), pourraient donc toujours influencer les performances mnésiques malgré leur lésion. En revanche, le LTM

étant une zone cruciale pour la consolidation des informations en mémoire (Mameniškienė et al., 2020 ; Narayanan et al., 2012 ; Tramonì et al., 2011), sa résection diminuerait les performances de mémoire musicale à long terme, et ce malgré l'effet bénéfique des émotions sur le processus de consolidation (Yonelinas & Ritchey, 2015). Plusieurs pistes ont été proposées afin de poursuivre ces travaux dans le but de mieux comprendre l'éventuel bénéfice des émotions sur la mémoire musicale de ces patients. Si la mémoire musicale des patients, grâce aux émotions générées par la musique, s'avère être plus résistante sur le long terme que les autres types de mémoire, des prises en charge musicales centrées sur les troubles mnésiques ont tout intérêt à être développées.

## Références

- Adelman, J. S., & Estes, Z. (2013). Emotion and memory : A recognition advantage for positive and negative words independent of arousal. *Cognition*, 129(3), 530-535. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.08.014>
- Adolphs, R. (2000). Impaired Emotional Declarative Memory Following Unilateral Amygdala Damage. *Learning & Memory*, 7(3), 180-186. <https://doi.org/10.1101/lm.7.3.180>
- Adolphs, R., Cahill, L., Schul, R., & Babinsky, R. (1997). Impaired Declarative Memory for Emotional Material Following Bilateral Amygdala Damage in Humans. *Learning & Memory*, 11.
- Adolphs, R., Tranel, D., Damasio, H., & Damasio, A. R. (1995). Fear and the human amygdala. *Journal of neuroscience*, 15(9), 5879-5891.
- Åhs, F., Kumlien, E., & Fredrikson, M. (2010). Arousal enhanced memory retention is eliminated following temporal lobe resection. *Brain and Cognition*, 73(3), 176-179. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.04.009>
- Akers, K. G., Martinez-Canabal, A., Restivo, L., Yiu, A. P., De Cristofaro, A., Hsiang, H.-L. (Liz), Wheeler, A. L., Guskjolen, A., Niibori, Y., Shoji, H., Ohira, K., Richards, B. A., Miyakawa, T., Josselyn, S. A., & Frankland, P. W. (2014). Hippocampal Neurogenesis Regulates Forgetting During Adulthood and Infancy. *Science*, 344(6184), 598-602. <https://doi.org/10.1126/science.1248903>
- Albouy, P., Benjamin, L., Morillon, B., & Zatorre, R. J. (2020). Distinct sensitivity to spectrotemporal modulation supports brain asymmetry for speech and melody. *Science*, 367(6481), 1043-1047. <https://doi.org/10.1126/science.aaz3468>
- Allone, C., Buono, V. L., Corallo, F., Pisani, L. R., Pollicino, P., Bramanti, P., & Marino, S. (2017). Neuroimaging and cognitive functions in temporal lobe epilepsy : A review of the literature. *Journal of the neurological sciences*, 381, 7-15.
- Alonso, I., Dellacherie, D., & Samson, S. (2015). Emotional memory for musical excerpts in young and older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2015.00023>

- Alqahtani, F., Imran, I., Pervaiz, H., Ashraf, W., Perveen, N., Rasool, M. F., Alasmari, A. F., Alharbi, M., Samad, N., Alqarni, S. A., Al-Rejaie, S. S., & Alanazi, M. M. (2020). Non-pharmacological Interventions for Intractable Epilepsy. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 28(8), 951-962. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2020.06.016>
- Altenmüller, E. O., Siggel, S., Mohammadi, B., Samii, A., & Münte, T. F. (2014). Play it again sam : Brain correlates of emotional music recognition. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00114>
- Anderson, A. K., Christoff, K., Stappen, I., Panitz, D., Ghahremani, D. G., Glover, G., Gabrieli, J. D. E., & Sobel, N. (2003). Dissociated neural representations of intensity and valence in human olfaction. *Nature Neuroscience*, 6(2), 196-202. <https://doi.org/10.1038/nn1001>
- Aubé, W., Angulo-Perkins, A., Peretz, I., Concha, L., & Armony, J. L. (2015). Fear across the senses : Brain responses to music, vocalizations and facial expressions. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 10(3), 399-407. <https://doi.org/10.1093/scan/nsu067>
- Aubé, W., Peretz, I., & Armony, J. L. (2013). The effects of emotion on memory for music and vocalisations. *Memory*, 21(8), 981-990. <https://doi.org/10.1080/09658211.2013.770871>
- Babinsky, R., Calabrese, P., Durwen, H. F., Markowitsch, H. J., Brechtelsbauer, D., Heuser, L., & Gehlen, W. (1993). The possible contribution of the amygdala to memory. *Behavioural Neurology*, 6(3), 167-170.
- Baumgartner, T., Lutz, K., Schmidt, C. F., & Jäncke, L. (2006). The emotional power of music : How music enhances the feeling of affective pictures. *Brain Research*, 1075(1), 151-164. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2005.12.065>
- Baxendale, S., Heaney, D., Thompson, P. J., & Duncan, J. S. (2010). Cognitive consequences of childhood-onset temporal lobe epilepsy across the adult lifespan. *Neurology*, 75(8), 705-711. <https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e3181eee3f0>
- Baxendale, S., & Thompson, P. (2005). Defining meaningful postoperative change in epilepsy surgery patients : Measuring the unmeasurable? *Epilepsy & Behavior*, 6(2), 207-211. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2004.12.009>

- Baxendale, S., & Thompson, P. (2018). Red flags in epilepsy surgery : Identifying the patients who pay a high cognitive price for an unsuccessful surgical outcome. *Epilepsy & Behavior*, 78, 269-272. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2017.08.003>
- Baxendale, S., Thompson, P. J., & Sander, J. W. (2013). Neuropsychological outcomes in epilepsy surgery patients with unilateral hippocampal sclerosis and good preoperative memory function. *Epilepsia*, 54(9), e131-e134. <https://doi.org/10.1111/epi.12319>
- Belin, P., McAdams, S., Thivard, L., Smith, B., Savel, S., Zilbovicius, M., Samson, S., & Samson, Y. (2002). The neuroanatomical substrate of sound duration discrimination. *Neuropsychologia*, 40(12), 1956-1964. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(02\)00062-3](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(02)00062-3)
- Benz, S., Sellaro, R., Hommel, B., & Colzato, L. S. (2016). Music Makes the World Go Round : The Impact of Musical Training on Non-musical Cognitive Functions—A Review. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.02023>
- Bercovici, E., Kumar, B. S., & Mirsattari, S. M. (2012). Neocortical Temporal Lobe Epilepsy. *Epilepsy Research and Treatment*, 2012, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2012/103160>
- Berg, A. T., Berkovic, S. F., Brodie, M. J., Buchhalter, J., Cross, J. H., van Emde Boas, W., Engel, J., French, J., Glauser, T. A., Mathern, G. W., Moshé, S. L., Nordli, D., Plouin, P., & Scheffer, I. E. (2010). Revised terminology and concepts for organization of seizures and epilepsies: Report of the ILAE Commission on Classification and Terminology, 2005-2009. *Epilepsia*, 51(4), 676-685. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2010.02522.x>
- Bermudez, P., Lerch, J. P., Evans, A. C., & Zatorre, R. J. (2009). Neuroanatomical Correlates of Musicianship as Revealed by Cortical Thickness and Voxel-Based Morphometry. *Cerebral Cortex*, 19(7), 1583-1596. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn196>
- Bertram, E. H. (2009). Temporal Lobe Epilepsy: Where Do the Seizures Really Begin? *Epilepsy & behavior : E&B*, 14(Suppl 1), 32-37. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2008.09.017>
- Besson, M., Chobert, J., & Marie, C. (2011). Transfer of Training between Music and Speech : Common Processing, Attention, and Memory. *Frontiers in Psychology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00094>

- Biebl, M., Cooper, C. M., Winkler, J., & Kuhn, H. G. (2000). Analysis of neurogenesis and programmed cell death reveals a self-renewing capacity in the adult rat brain. *Neuroscience Letters*, 291(1), 17-20. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(00\)01368-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(00)01368-9)
- Bigand, E., Vieillard, S., Madurell, F., Marozeau, J., & Dacquet, A. (2005). Multidimensional scaling of emotional responses to music : The effect of musical expertise and of the duration of the excerpts. *Cognition & Emotion*, 19(8), 1113-1139. <https://doi.org/10.1080/02699930500204250>
- Bird, L. J., Jackson, G. D., & Wilson, S. J. (2019). Music training is neuroprotective for verbal cognition in focal epilepsy. *Brain*, 142(7). <https://doi.org/10.1093/brain/awz124>
- Blair, R. D. G. (2012). Temporal Lobe Epilepsy Semiology. *Epilepsy Research and Treatment*, 2012, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2012/751510>
- Blood, A. J., & Zatorre, R. J. (2001). 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. <https://doi.org/10.1073/pnas.191355898>
- Blood, A. J., Zatorre, R. J., Bermudez, P., & Evans, A. C. (1999). Emotional responses to pleasant and unpleasant music correlate with activity in paralimbic brain regions. *Nature Neuroscience*, 2(4), 382-387. <https://doi.org/10.1038/7299>
- Blumcke, I., Spreafico, R., Haaker, G., Coras, R., Kobow, K., Bien, C. G., Pfäfflin, M., Elger, C., Widman, G., Schramm, J., Becker, A., Braun, K. P., Leijten, F., Baayen, J. C., Aronica, E., Chassoux, F., Hamer, H., Stefan, H., Rössler, K., ... Avanzini, G. (2017). Histopathological Findings in Brain Tissue Obtained during Epilepsy Surgery. *New England Journal of Medicine*, 377(17), 1648-1656. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1703784>
- Blümcke, I., Thom, M., Aronica, E., Armstrong, D. D., Bartolomei, F., Bernasconi, A., Bernasconi, N., Bien, C. G., Cendes, F., Coras, R., Cross, J. H., Jacques, T. S., Kahane, P., Mathern, G. W., Miyata, H., Moshé, S. L., Oz, B., Özkara, Ç., Perucca, E., ... Spreafico, R. (2013). International consensus classification of hippocampal sclerosis in temporal lobe epilepsy : A Task Force report from the ILAE Commission on Diagnostic Methods. *Epilepsia*, 54(7), 1315-1329. <https://doi.org/10.1111/epi.12220>

- Bonelli, S. B., Powell, R., Thompson, P. J., Yogarajah, M., Focke, N. K., Stretton, J., Vollmar, C., Symms, M. R., Price, C. J., Duncan, J. S., & Koepp, M. J. (2011). Hippocampal activation correlates with visual confrontation naming : FMRI findings in controls and patients with temporal lobe epilepsy. *Epilepsy Research*, 95(3), 246-254. <https://doi.org/10.1016/j.epilepsyres.2011.04.007>
- Bonora, A., Benuzzi, F., Monti, G., Mirandola, L., Pugnaghi, M., Nichelli, P., & Meletti, S. (2011). Recognition of emotions from faces and voices in medial temporal lobe epilepsy. *Epilepsy & Behavior*, 20(4), 648-654. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2011.01.027>
- Bora, E., & Meletti, S. (2016). Social cognition in temporal lobe epilepsy : A systematic review and meta-analysis. *Epilepsy & Behavior*, 60, 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2016.04.024>
- Boylan, L. S., Flint, L. A., Labovitz, D. L., Jackson, S. C., Starner, K., & Devinsky, O. (2004). Depression but not seizure frequency predicts quality of life in treatment-resistant epilepsy. *Neurology*, 62(2), 258-261. <https://doi.org/10.1212/01.WNL.0000103282.62353.85>
- Bradley, M. M., Codispoti, M., Sabatinelli, D., & Lang, P. J. (2001). Emotion and motivation II: Sex differences in picture processing. *Emotion*, 1(3), 300-319. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.1.3.300>
- Bradley, M. M., Greenwald, M. K., Petry, M. C., & Lang, P. J. (1992). Remembering pictures : Pleasure and arousal in memory. *Journal of experimental psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18(2), 379.
- Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion : The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 25(1), 49-59. [https://doi.org/10.1016/0005-7916\(94\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0005-7916(94)90063-9)
- Brattico, E., Bogert, B., Alluri, V., Tervaniemi, M., Eerola, T., & Jacobsen, T. (2016). It's Sad but I Like It : The Neural Dissociation Between Musical Emotions and Liking in Experts and Laypersons. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2015.00676>

- Brearly, T. W., Shura, R. D., Martindale, S. L., Lazowski, R. A., Luxton, D. D., Shenal, B. V., & Rowland, J. A. (2017). Neuropsychological Test Administration by Videoconference : A Systematic Review and Meta-Analysis. *Neuropsychology Review*, 27(2), 174-186. <https://doi.org/10.1007/s11065-017-9349-1>
- Breiter, H. C., Gollub, R. L., Weisskoff, R. M., Kennedy, D. N., Makris, N., Berke, J. D., Goodman, J. M., Kantor, H. L., Gastfriend, D. R., Riorden, J. P., Mathew, R. T., Rosen, B. R., & Hyman, S. E. (1997). Acute Effects of Cocaine on Human Brain Activity and Emotion. *Neuron*, 19(3), 591-611. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(00\)80374-8](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(00)80374-8)
- Brown, S., Martinez, M. J., & Parsons, L. M. (2004). Passive music listening spontaneously engages limbic and paralimbic systems. *Neuroreport*, 15(13), 2033-2037.
- Buchanan, T. W., Denburg, N. L., Tranel, D., & Adolphs, R. (2001). Verbal and Nonverbal Emotional Memory Following Unilateral Amygdala Damage. *Learning & Memory*, 8(6), 326-335. <https://doi.org/10.1101/lm.40101>
- Busch, R. M., Floden, D. P., Prayson, B., Chapin, J. S., Kim, K. H., Ferguson, L., Bingaman, W., & Najm, I. M. (2016). Estimating risk of word-finding problems in adults undergoing epilepsy surgery. *Neurology*, 87(22), 2363-2369. <https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000003378>
- Cabeza, R., & Dolcos, F. (2002). Event-related potentials of emotional memory : Encoding pleasant, unpleasant, and neutral pictures. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 2(3), 252-263. <https://doi.org/10.3758/CABN.2.3.252>
- Cahill, L., Babinsky, R., Markowitsch, H. J., & McGaugh, J. (1995). The amygdala and emotional memory. *Nature*, 377(6547). <https://pub.uni-bielefeld.de/record/1640097>
- Cahill, L., & McGaugh, J. L. (1995). A novel demonstration of enhanced memory associated with emotional arousal. *Consciousness and cognition*, 4(4), 410-421.
- Calderon-Garcidueñas, A. L., Mathon, B., Lévy, P., Bertrand, A., Mokhtari, K., Samson, V., Thuriès, V., Lambrecq, V., Nguyen-Michel, V., Dupont, S., Adam, C., Baulac, M., Clémenceau, S., Duyckaerts, C., Navarro, V., & Bielle, F. (2018). New clinicopathological associations and histoprognostic markers in ILAE types of hippocampal sclerosis. *Brain Pathology*, 28(5), 644-655. <https://doi.org/10.1111/bpa.12596>

- Canli, T., Zhao, Z., Brewer, J., Gabrieli, J. D. E., & Cahill, L. (2000). Event-Related Activation in the Human Amygdala Associates with Later Memory for Individual Emotional Experience. *The Journal of Neuroscience*, 20(19), RC99-RC99. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.20-19-j0004.2000>
- Cardona, G., Rodriguez-Fornells, A., Nye, H., Rifà-Ros, X., & Ferreri, L. (2020). The impact of musical pleasure and musical hedonia on verbal episodic memory. *Scientific Reports*, 10(1), 16113. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72772-3>
- Carlesimo, G. A. (2022). The temporal lobes and memory. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 187, p. 319-337). Elsevier.
- Carvajal, F., Calahorra-Romillo, A., Rubio, S., & Martín, P. (2020). *Verbal emotional memory laterality effect on amygdalohippocampectomy for refractory epilepsy*. 7. <https://doi.org/10.1002/brb3.1872>
- Cassel, A., Morris, R., Koutroumanidis, M., & Kopelman, M. (2016). Forgetting in temporal lobe epilepsy: When does it become accelerated? *Cortex*, 78, 70-84. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.02.005>
- Chelune, G. J. (1995). Hippocampal adequacy versus functional reserve : Predicting memory functions following temporal lobectomy. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 10(5), 413-432.
- Cheung, M., Chan, A. S., Chan, Y., Lam, J. M. K., & Lam, W. (2006). Effects of Illness Duration on Memory Processing of Patients with Temporal Lobe Epilepsy. *Epilepsia*, 47(8), 1320-1328. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2006.00556.x>
- Cleary, R. A., Baxendale, S. A., Thompson, P. J., & Foong, J. (2013). Predicting and preventing psychopathology following temporal lobe epilepsy surgery. *Epilepsy & Behavior*, 26(3), 322-334. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2012.09.038>
- Cohen, A. J. (2011). Music as a source of emotion in film. In P. N. Juslin & J. Sloboda (Éds.), *Handbook of Music and Emotion : Theory, Research, Applications* (p. 249-272). Oxford University Press.
- Comblain, C., D'Argembeau, A., Van der Linden, M., & Aldenhoff, L. (2004). The effect of ageing on the recollection of emotional and neutral pictures. *Memory*, 12(6), 673-684. <https://doi.org/10.1080/09658210344000477>

- Cowen, A. S., Fang, X., Sauter, D., & Keltner, D. (2020). What music makes us feel : At least 13 dimensions organize subjective experiences associated with music across different cultures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(4), 1924-1934. <https://doi.org/10.1073/pnas.1910704117>
- Craik, F. I. M., & Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing : A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 11(6), 671-684. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(72\)80001-X](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(72)80001-X)
- Critchley, M. (1937). Musicogenic Epilepsy. *Brain*, 60(1), 13-27. <https://doi.org/10.1093/brain/60.1.13>
- Della Bella, S., Peretz, I., & Aronoff, N. (2003). Time course of melody recognition : A gating paradigm study. *Perception & Psychophysics*, 65(7), 1019-1028. <https://doi.org/10.3758/BF03194831>
- Dellacherie, D., Bigand, E., Molin, P., Baulac, M., & Samson, S. (2011). Multidimensional scaling of emotional responses to music in patients with temporal lobe resection. *Cortex*, 47(9), 1107-1115. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.05.007>
- Dellacherie, D., Ehrlé, N., & Samson, S. (2008). Is the neutral condition relevant to study musical emotion in patients ? *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 25(4), 285-294. <https://doi.org/10.1525/mp.2008.25.4.285>
- Dellacherie, D., Hasboun, D., Baulac, M., Belin, P., & Samson, S. (2011). Impaired recognition of fear in voices and reduced anxiety after unilateral temporal lobe resection. *Neuropsychologia*, 49(4), 618-629. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.11.008>
- Dellacherie, D., Pfeuty, M., Hasboun, D., Lefèvre, J., Hugueville, L., Schwartz, D. P., Baulac, M., Adam, C., & Samson, S. (2009). The Birth of Musical Emotion : A Depth Electrode Case Study in a Human Subject with Epilepsy. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169(1), 336-341. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04870.x>
- Dellacherie, D., Roy, M., Hugueville, L., Peretz, I., & Samson, S. (2011). The effect of musical experience on emotional self-reports and psychophysiological responses to dissonance : Psychophysiology of musical emotion. *Psychophysiology*, 48(3), 337-349. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2010.01075.x>

- Denburg, N. L., Buchanan, T. W., Tranel, D., & Adolphs, R. (2003). Evidence for preserved emotional memory in normal older persons. *Emotion*, 3(3), 239-253. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.3.3.239>
- Diana, R. A., Yonelinas, A. P., & Ranganath, C. (2007). Imaging recollection and familiarity in the medial temporal lobe : A three-component model. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(9), 379-386. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.08.001>
- Diao, L., Yu, H., Zheng, J., Chen, Z., Huang, D., & Yu, L. (2015). Abnormalities of the uncinate fasciculus correlate with executive dysfunction in patients with left temporal lobe epilepsy. *Magnetic Resonance Imaging*, 33(5), 544-550. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2015.02.011>
- Dodrill, C. B. (2004). Neuropsychological effects of seizures. *Epilepsy & Behavior*, 5, 21-24. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2003.11.004>
- Dolcos, F., LaBar, K. S., & Cabeza, R. (2004a). Interaction between the Amygdala and the Medial Temporal Lobe Memory System Predicts Better Memory for Emotional Events. *Neuron*, 42(5), 855-863. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(04\)00289-2](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(04)00289-2)
- Dolcos, F., LaBar, K. S., & Cabeza, R. (2004b). Dissociable effects of arousal and valence on prefrontal activity indexing emotional evaluation and subsequent memory : An event-related fMRI study. *NeuroImage*, 23(1), 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.05.015>
- Dolcos, F., LaBar, K. S., & Cabeza, R. (2005). Remembering one year later : Role of the amygdala and the medial temporal lobe memory system in retrieving emotional memories. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(7), 2626-2631. <https://doi.org/10.1073/pnas.0409848102>
- Domínguez-Borràs, J., Guex, R., Méndez-Bértolo, C., Legendre, G., Spinelli, L., Moratti, S., Frühholz, S., Mégevand, P., Arnal, L., Strange, B., Seeck, M., & Vuilleumier, P. (2019). Human amygdala response to unisensory and multisensory emotion input : No evidence for superadditivity from intracranial recordings. *Neuropsychologia*, 131, 9-24. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.05.027>
- Ebbinghaus, H. (1885). *Über das gedächtnis: Untersuchungen zur experimentellen psychologie*. Duncker.

- Edwards, M., Stewart, E., Palermo, R., & Lah, S. (2017). Facial emotion perception in patients with epilepsy : A systematic review with meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 83, 212-225. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.10.013>
- Eerola, T., Friberg, A., & Bresin, R. (2013). Emotional expression in music : Contribution, linearity, and additivity of primary musical cues. *Frontiers in Psychology*, 4, 487. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00487>
- Eerola, T., & Vuoskoski, J. K. (2011). A comparison of the discrete and dimensional models of emotion in music. *Psychology of Music*, 39(1), 18-49. <https://doi.org/10.1177/0305735610362821>
- Efron, R. (1963). Temporal perception, aphasia and déjà vu. *Brain: A Journal of Neurology*, 86, 403-424. <https://doi.org/10.1093/brain/86.3.403>
- Ehrlé, N., Samson, S., & Baulac, M. (2001). Processing of rapid auditory information in epileptic patients with left temporal lobe damage. *Neuropsychologia*, 39(5), 525-531. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(00\)00121-4](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(00)00121-4)
- Ekman, P. (1992). An argument for basic emotions. *Cognition & emotion*, 6(3-4), 169-200.
- Eldar, E., Ganor, O., Admon, R., Bleich, A., & Hendler, T. (2007). Feeling the Real World : Limbic Response to Music Depends on Related Content. *Cerebral Cortex*, 17(12), 2828-2840. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhm011>
- Elger, C. E., Helmstaedter, C., & Kurthen, M. (2004). Chronic epilepsy and cognition. *The Lancet Neurology*, 3(11), 663-672. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(04\)00906-8](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(04)00906-8)
- Eschrich, S., Münte, T. F., & Altenmüller, E. O. (2005). Remember Bach : An Investigation in Episodic Memory for Music. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060(1), 438-442. <https://doi.org/10.1196/annals.1360.045>
- Eschrich, S., Münte, T. F., & Altenmüller, E. O. (2008). Unforgettable film music : The role of emotion in episodic long-term memory for music. *BMC Neuroscience*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/1471-2202-9-48>
- Everaert, T., Spruyt, A., & De Houwer, J. (2011). On the (un) conditionality of automatic attitude activation : The valence proportion effect. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 65(2), 125.

- Fares, J., Bou Diab, Z., Nabha, S., & Fares, Y. (2019). Neurogenesis in the adult hippocampus : History, regulation, and prospective roles. *International Journal of Neuroscience*, 129(6), 598-611. <https://doi.org/10.1080/00207454.2018.1545771>
- Fastenrath, M., Coynel, D., Spalek, K., Milnik, A., Gschwind, L., Roozendaal, B., Papassotiropoulos, A., & de Quervain, D. J. F. (2014). Dynamic Modulation of Amygdala-Hippocampal Connectivity by Emotional Arousal. *Journal of Neuroscience*, 34(42), 13935-13947. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0786-14.2014>
- Ferreri, L., & Rodriguez-Fornells, A. (2017). Music-related reward responses predict episodic memory performance. *Experimental Brain Research*, 235(12), 3721-3731. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5095-0>
- Ferreri, L., & Rodriguez-Fornells, A. (2022). Memory modulations through musical pleasure. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1516(1), 5-10. <https://doi.org/10.1111/nyas.14867>
- Ferreri, L., & Verga, L. (2016). Benefits of Music on Verbal Learning and Memory : How and When Does It Work? *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 34(2), 167-182. <https://doi.org/10.1525/mp.2016.34.2.167>
- Fisher, R. S., Acevedo, C., Arzimanoglou, A., Bogacz, A., Cross, J. H., Elger, C. E., Engel, J., Forsgren, L., French, J. A., Glynn, M., Hesdorffer, D. C., Lee, B. I., Mathern, G. W., Moshé, S. L., Perucca, E., Scheffer, I. E., Tomson, T., Watanabe, M., & Wiebe, S. (2014). ILAE Official Report : A practical clinical definition of epilepsy. *Epilepsia*, 55(4), 475-482. <https://doi.org/10.1111/epi.12550>
- Fisher, R. S., Boas, W. van E., Blume, W., Elger, C., Genton, P., Lee, P., & Engel, J. (2005). Epileptic Seizures and Epilepsy : Definitions Proposed by the International League Against Epilepsy (ILAE) and the International Bureau for Epilepsy (IBE). *Epilepsia*, 46(4), 470-472. <https://doi.org/10.1111/j.0013-9580.2005.66104.x>
- Frank, J. E., & Tomaz, C. (2003). Lateralized impairment of the emotional enhancement of verbal memory in patients with amygdala–hippocampus lesion. *Brain and Cognition*, 52(2), 223-230. [https://doi.org/10.1016/S0278-2626\(03\)00075-7](https://doi.org/10.1016/S0278-2626(03)00075-7)

- Franklin, M. S., Sledge Moore, K., Yip, C.-Y., Jonides, J., Rattray, K., & Moher, J. (2008). The effects of musical training on verbal memory. *Psychology of Music*, 36(3), 353-365. <https://doi.org/10.1177/0305735607086044>
- Friederici, A. D. (2011). The Brain Basis of Language Processing : From Structure to Function. *Physiological Reviews*, 91(4), 1357-1392. <https://doi.org/10.1152/physrev.00006.2011>
- Fritz, T., Jentschke, S., Gosselin, N., Sammler, D., Peretz, I., Turner, R., Friederici, A. D., & Koelsch, S. (2009). Universal Recognition of Three Basic Emotions in Music. *Current Biology*, 19(7), 573-576. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.02.058>
- Fuentes-Sánchez, N., Pastor, R., Eerola, T., & Pastor, M. C. (2021). Spanish adaptation of a film music stimulus set (FMSS) : Cultural and gender differences in the perception of emotions prompted by music excerpts. *Psychology of Music*, 030573562095846. <https://doi.org/10.1177/0305735620958464>
- Fuentes-Sánchez, N., Pastor, R., Escrig, M. A., Elipe-Miravet, M., & Pastor, M. C. (2021). Emotion elicitation during music listening : Subjective self-reports, facial expression, and autonomic reactivity. *Psychophysiology*, 58(9), e13884. <https://doi.org/10.1111/psyp.13884>
- Gagnon, L., & Peretz, I. (2003). Mode and tempo relative contributions to “happy-sad” judgements in equitone melodies. *Cognition and emotion*, 17(1), 25-40.
- Garcia, C. S. (2012). Depression in Temporal Lobe Epilepsy : A Review of Prevalence, Clinical Features, and Management Considerations. *Epilepsy Research and Treatment*, 2012, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2012/809843>
- Giovagnoli, A. R., Parente, A., Ciuffini, R., Tallarita, G. M., Turner, K., Maialetti, A., Marrelli, A. M., Pucci, B., & the Study Group on Cognitive Neurology, Neuropsychology – Adult Section of the Italian League Against Epilepsy. (2021). Diversified social cognition in temporal lobe epilepsy. *Acta Neurologica Scandinavica*, 143(4), 396-406. <https://doi.org/10.1111/ane.13386>
- Gläscher, J., & Adolphs, R. (2003). Processing of the Arousal of Subliminal and Supraliminal Emotional Stimuli by the Human Amygdala. *The Journal of Neuroscience*, 23(32), 10274-10282. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-32-10274.2003>

- Glikmann-Johnston, Y., Saling, M. M., Chen, J., Cooper, K. A., Beare, R. J., & Reutens, D. C. (2008). Structural and functional correlates of unilateral mesial temporal lobe spatial memory impairment. *Brain*, 131(11), 3006-3018. <https://doi.org/10.1093/brain/awn213>
- Gold, B. P., Mas-Herrero, E., Zeighami, Y., Benovoy, M., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2019). Musical reward prediction errors engage the nucleus accumbens and motivate learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(8), 3310-3315. <https://doi.org/10.1073/pnas.1809855116>
- Gomes, C. F. A., Brainerd, C. J., & Stein, L. M. (2013). Effects of emotional valence and arousal on recollective and nonrecollective recall. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 39(3), 663-677. <https://doi.org/10.1037/a0028578>
- Gomez-Ibañez, A., Urrestarazu, E., & Viteri, C. (2014). Recognition of facial emotions and identity in patients with mesial temporal lobe and idiopathic generalized epilepsy : An eye-tracking study. *Seizure*, 23(10), 892-898. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2014.08.012>
- Gosselin, N., Peretz, I., Hasboun, D., Baulac, M., & Samson, S. (2011). Impaired recognition of musical emotions and facial expressions following anteromedial temporal lobe excision. *Cortex*, 47(9), 1116-1125. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.05.012>
- Gosselin, N., Peretz, I., Johnsen, E., & Adolphs, R. (2007). Amygdala damage impairs emotion recognition from music. *Neuropsychologia*, 45(2), 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.07.012>
- Gosselin, N., Peretz, I., Noulhiane, M., Hasboun, D., Beckett, D., Baulac, M., & Samson, S. (2005). Impaired recognition of scary music following unilateral temporal lobe excision. *Brain*, 128(3), 628-640. <https://doi.org/10.1093/brain/awh420>
- Grant, A. C. (2005). Interictal perceptual function in epilepsy. *Epilepsy & Behavior*, 6(4), 511-519. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2005.03.016>
- Greenberg, Tokarev, & Estes. (2012). Affective Orientation Influences Memory for Emotional and Neutral Words. *The American Journal of Psychology*, 125(1), 71. <https://doi.org/10.5406/amerjpsyc.125.1.0071>

- Grewe, O., Kopiez, R., & Altenmüller, E. (2009). The Chill Parameter : Goose Bumps and Shivers as Promising Measures in Emotion Research. *Music Perception*, 27(1), 61-74. <https://doi.org/10.1525/mp.2009.27.1.61>
- Halpern, A. R., & Müllensiefen, D. (2008). Effects of timbre and tempo change on memory for music. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(9), 1371-1384. <https://doi.org/10.1080/17470210701508038>
- Halwani, G. F., Loui, P., Rüber, T., & Schlaug, G. (2011). Effects of Practice and Experience on the Arcuate Fasciculus : Comparing Singers, Instrumentalists, and Non-Musicians. *Frontiers in Psychology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00156>
- Hamann, S. B. (2001). Cognitive and neural mechanisms of emotional memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(9), 394-400. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01707-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01707-1)
- Hamann, S. B., Ely, T. D., Grafton, S. T., & Kilts, C. D. (1999). Amygdala activity related to enhanced memory for pleasant and aversive stimuli. *Nature Neuroscience*, 2(3), 289-293. <https://doi.org/10.1038/6404>
- Hamann, S. B., Lee, G. P., & Adolphs, R. (1999). Impaired declarative emotional memory but intact emotional responses following human bilateral amygdalotomy. *Society for Neuroscience Abstracts*, 25, 99.
- Hellige, J. B. (1993). Unity of Thought and Action : Varieties of Interaction Between the Left and Right Cerebral Hemispheres. *Current Directions in Psychological Science*, 2(1), 21-26. <https://doi.org/10.1111/1467-8721.ep10770559>
- Helmstaedter, C., Grunwald, Th., Lehnertz, K., Gleißner, U., & Elger, C. E. (1997). Differential Involvement of Left Temporolateral and Temporomesial Structures in Verbal Declarative Learning and Memory : Evidence from Temporal Lobe Epilepsy. *Brain and Cognition*, 35(1), 110-131. <https://doi.org/10.1006/brcg.1997.0930>
- Hennion, S., Szurhaj, W., Duhamel, A., Lopes, R., Tyvaert, L., Derambure, P., & Delbeuck, X. (2015). Characterization and prediction of the recognition of emotional faces and emotional bursts in temporal lobe epilepsy. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 37(9), 931-945. <https://doi.org/10.1080/13803395.2015.1068280>

- Herholz, S. C., & Zatorre, R. J. (2012). Musical Training as a Framework for Brain Plasticity : Behavior, Function, and Structure. *Neuron*, 76(3), 486-502. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.10.011>
- Hermann, B., Seidenberg, M., & Jones, J. (2008). The neurobehavioural comorbidities of epilepsy : Can a natural history be developed? *The Lancet Neurology*, 7(2), 151-160. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(08\)70018-8](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(08)70018-8)
- Hermans, E. J., Battaglia, F. P., Atsak, P., de Voogd, L. D., Fernández, G., & Roozendaal, B. (2014). How the amygdala affects emotional memory by altering brain network properties. *Neurobiology of Learning and Memory*, 112, 2-16. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2014.02.005>
- Hixson, J. D., & Kirsch, H. E. (2009). The effects of epilepsy and its treatments on affect and emotion. *Neurocase*, 15(3), 206-216. <https://doi.org/10.1080/13554790802632876>
- Hlobil, U., Rathore, C., Alexander, A., Sarma, S., & Radhakrishnan, K. (2008). Impaired facial emotion recognition in patients with mesial temporal lobe epilepsy associated with hippocampal sclerosis (MTLE-HS) : Side and age at onset matters. *Epilepsy Research*, 80(2-3), 150-157. <https://doi.org/10.1016/j.eplepsyres.2008.03.018>
- Hoppe, C., Elger, C. E., & Helmstaedter, C. (2007). Long-term memory impairment in patients with focal epilepsy : Long-Term Memory Impairment in Patients with Focal Epilepsy. *Epilepsia*, 48, 26-29. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2007.01397.x>
- Hu, P., Stylos-Allan, M., & Walker, M. P. (2006). Sleep Facilitates Consolidation of Emotional Declarative Memory. *Psychological Science*, 17(10), 891-898. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01799.x>
- Huijgen, J., Dellacherie, D., Tillmann, B., Clément, S., Bigand, E., Dupont, S., & Samson, S. (2015). The feeling of familiarity for music in patients with a unilateral temporal lobe lesion : A gating study. *Neuropsychologia*, 77, 313-320. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.09.007>
- Husain, G., Thompson, W. F., & Schellenberg, E. G. (2002). Effects of Musical Tempo and Mode on Arousal, Mood, and Spatial Abilities. *Music Perception*, 20(2), 151-171. <https://doi.org/10.1525/mp.2002.20.2.151>

- Inaba, M., Nomura, M., & Ohira, H. (2005). Neural evidence of effects of emotional valence on word recognition. *International Journal of Psychophysiology*, 57(3), 165-173. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2005.01.002>
- Ives-Deliperi, V. L., & Butler, J. T. (2012). Naming outcomes of anterior temporal lobectomy in epilepsy patients : A systematic review of the literature. *Epilepsy & Behavior*, 24(2), 194-198. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2012.04.115>
- Ivry, R. B., & Robertson, L. C. (1998). *The Two Sides of Perception*. MIT Press.
- Jäncke, L. (2009). Music drives brain plasticity. *F1000 Biology Reports*, 1(78).
- Jeyaraj, M. K., Menon, R. N., Justus, S., Alexander, A., Sarma, P. S., & Radhakrishnan, K. (2013). A critical evaluation of the lateralizing significance of material-specific memory deficits in patients with mesial temporal lobe epilepsy with hippocampal sclerosis. *Epilepsy & Behavior: E&B*, 28(3), 460-466. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2013.06.011>
- Johnsrude, I. S., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2000). Functional specificity in the right human auditory cortex for perceiving pitch direction. *Brain*, 123(1), 155-163. <https://doi.org/10.1093/brain/123.1.155>
- Jokeit, H., Krämer, G., & Ebner, A. (2005). Do antiepileptic drugs accelerate forgetting? *Epilepsy & Behavior*, 6(3), 430-432. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2004.12.012>
- Jones-Gotman, M., Zatorre, R. J., Olivier, A., Andermann, F., Cendes, F., Staunton, H., McMackin, D., Siegel, A. M., & Wieser, H. G. (1997). Learning and retention of words and designs following excision from medial or lateral temporal-lobe structures. *Neuropsychologia*, 35(7), 963-973. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(97\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(97)00024-9)
- Juslin, P. N. (2019). *Musical Emotions Explained : Unlocking the Secrets of Musical Affect*. Oxford University Press.
- Juslin, P. N., & Västfjäll, D. (2008). Emotional responses to music : The need to consider underlying mechanisms. *Behavioral and Brain Sciences*, 31(05). <https://doi.org/10.1017/S0140525X08005293>

- Kaaden, S., & Helmstaedter, C. (2009). Age at onset of epilepsy as a determinant of intellectual impairment in temporal lobe epilepsy. *Epilepsy & Behavior*, 15(2), 213-217. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2009.03.027>
- Kanner, A. M. (2016). Psychiatric comorbidities in epilepsy : Should they be considered in the classification of epileptic disorders? *Epilepsy & Behavior*, 64, 306-308. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2016.06.040>
- Keller, S. S., Baker, G., Downes, J. J., & Roberts, N. (2009). Quantitative MRI of the prefrontal cortex and executive function in patients with temporal lobe epilepsy. *Epilepsy & Behavior*, 15(2), 186-195. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2009.03.005>
- Keller, S. S., & Roberts, N. (2008). Voxel-based morphometry of temporal lobe epilepsy : An introduction and review of the literature. *Epilepsia*, 49(5), 741-757. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2007.01485.x>
- Kensinger, E. A. (2007). Negative Emotion Enhances Memory Accuracy : Behavioral and Neuroimaging Evidence. *Current Directions in Psychological Science*, 16(4), 213-218. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2007.00506.x>
- Kensinger, E. A. (2008). Age Differences in Memory for Arousing and Nonarousing Emotional Words. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 63(1), P13-P18. <https://doi.org/10.1093/geronb/63.1.P13>
- Kensinger, E. A., & Corkin, S. (2004). Two routes to emotional memory : Distinct neural processes for valence and arousal. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(9), 3310-3315.
- Khalfa, S., Delbe, C., Bigand, E., Reynaud, E., Chauvel, P., & Liégeois-Chauvel, C. (2008). Positive and negative music recognition reveals a specialization of mesio-temporal structures in epileptic patients. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 25(4), 295-302. <https://doi.org/10.1525/mp.2008.25.4.295>
- Khalfa, S., Guye, M., Peretz, I., Chapon, F., Girard, N., Chauvel, P., & Liégeois-Chauvel, C. (2008). Evidence of lateralized anteromedial temporal structures involvement in musical emotion processing. *Neuropsychologia*, 46(10), 2485-2493. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.04.009>

- Khalil, A. F., Iwasaki, M., Nishio, Y., Jin, K., Nakasato, N., & Tominaga, T. (2016). Verbal Dominant Memory Impairment and Low Risk for Post-operative Memory Worsening in Both Left and Right Temporal Lobe Epilepsy Associated with Hippocampal Sclerosis. *Neurologia Medico-Chirurgica*, 56(11), 716-723. <https://doi.org/10.2176/nmc.oa.2016-0004>
- Kim, S.-G., Lepsien, J., Fritz, T. H., Mildner, T., & Mueller, K. (2017). Dissonance encoding in human inferior colliculus covaries with individual differences in dislike of dissonant music. *Scientific Reports*, 7(1), 5726. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06105-2>
- Koelsch, S. (2014). Brain correlates of music-evoked emotions. *Nature Reviews Neuroscience*, 15(3), 170-180. <https://doi.org/10.1038/nrn3666>
- Koelsch, S. (2018). Investigating the Neural Encoding of Emotion with Music. *Neuron*, 98(6), 1075-1079. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.04.029>
- Koelsch, S. (2020). A coordinate-based meta-analysis of music-evoked emotions. *NeuroImage*, 223, 117350. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117350>
- Koelsch, S., Fritz, T., & Schlaug, G. (2008). Amygdala activity can be modulated by unexpected chord functions during music listening. *Neuroreport*, 19(18), 1815-1819.
- Koelsch, S., Fritz, T., v. Cramon, D. Y., Müller, K., & Friederici, A. D. (2006). Investigating emotion with music: An fMRI study. *Human Brain Mapping*, 27(3), 239-250. <https://doi.org/10.1002/hbm.20180>
- Kotwas, I., McGonigal, A., Bastien-Toniazzo, M., Bartolomei, F., & Micoulaud-Franchi, J.-A. (2017). Stress regulation in drug-resistant epilepsy. *Epilepsy & Behavior*, 71, 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2017.01.025>
- Kucukboyaci, N. E., Kemmotsu, N., Leyden, K. M., Girard, H. M., Tecoma, E. S., Iragui, V. J., & McDonald, C. R. (2014). Integration of multimodal MRI data via PCA to explain language performance. *NeuroImage: Clinical*, 5, 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2014.05.006>
- Kwan, P., Arzimanoglou, A., Berg, A. T., Brodie, M. J., Allen Hauser, W., Mathern, G., Moshé, S. L., Perucca, E., Wiebe, S., & French, J. (2009). Definition of drug resistant epilepsy : Consensus proposal by the ad hoc Task Force of the ILAE Commission on Therapeutic

- Strategies: Definition of Drug Resistant Epilepsy. *Epilepsia*, 51(6), 1069-1077. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2009.02397.x>
- Kwan, P., & Brodie, M. J. (2001). Neuropsychological effects of epilepsy and antiepileptic drugs. *The Lancet*, 357(9251), 216-222. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(00\)03600-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)03600-X)
- Kwon, O.-Y., & Park, S.-P. (2014). Depression and Anxiety in People with Epilepsy. *Journal of Clinical Neurology*, 10(3), 175-188. <https://doi.org/10.3988/jcn.2014.10.3.175>
- LaBar, K. S., & Phelps, E. A. (1998). Arousal-Mediated Memory Consolidation : Role of the Medial Temporal Lobe in Humans. *Psychological Science*, 9(6), 490-493. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00090>
- Lam, H. L., Li, W. T. V., Laher, I., & Wong, R. Y. (2020). Effects of Music Therapy on Patients with Dementia—A Systematic Review. *Geriatrics*, 5(4), 62. <https://doi.org/10.3390/geriatrics5040062>
- Lancelot, C., Ahad, P., Noulhiane, M., Hasboun, D., Baulac, M., & Samson, S. (2005). Loss of memory for auditory–spatial associations following unilateral medial temporal-lobe damage. *Neuropsychologia*, 43(13), 1975-1982. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.03.006>
- Lee, T. M. C., Yip, J. T. H., & Jones-Gotman, M. (2002). Memory Deficits after Resection from Left or Right Anterior Temporal Lobe in Humans : A Meta-Analytic Review. *Epilepsia*, 43(3), 283-291. <https://doi.org/10.1046/j.1528-1157.2002.09901.x>
- Lerner, Y., Papo, D., Zhdanov, A., Belozersky, L., & Hendler, T. (2009). Eyes Wide Shut : Amygdala Mediates Eyes-Closed Effect on Emotional Experience with Music. *PLoS ONE*, 4(7), e6230. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006230>
- Les traitements.* (2022). Fondation Française pour la Recherche sur l'Épilepsie. <https://www.fondation-epilepsie.fr/comprendre-lepilepsie/les-traitements/>
- Lespinet, V., Bresson, C., N'Kaoua, B., Rougier, A., & Claverie, B. (2002). Effect of age of onset of temporal lobe epilepsy on the severity and the nature of preoperative memory deficits. *Neuropsychologia*, 40(9), 1591-1600. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(02\)00012-X](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(02)00012-X)

- Li, X., Li, X., Chen, S., Zhu, J., Wang, H., Tian, Y., & Yu, Y. (2018). Effect of emotional enhancement of memory on recollection process in young adults : The influence factors and neural mechanisms. *Brain Imaging and Behavior*, 14, 119-129. <https://doi.org/10.1007/s11682-018-9975-0>
- Liégeois-Chauvel, C. (1998). Contribution of different cortical areas in the temporal lobes to music processing. *Brain*, 121(10), 1853-1867. <https://doi.org/10.1093/brain/121.10.1853>
- Liégeois-Chauvel, C., Bénar, C., Krieg, J., Delbé, C., Chauvel, P., Giusiano, B., & Bigand, E. (2014). How functional coupling between the auditory cortex and the amygdala induces musical emotion : A single case study. *Cortex*, 60, 82-93. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2014.06.002>
- Lima, E. M., Gois, J., Paiva, M. L., Vincentiis, S., Moschetta, S., & Valente, K. D. R. (2021). Anxiety symptoms are the strongest predictor of quality of life in temporal lobe epilepsy. *Seizure*, 88, 78-82. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2021.03.021>
- Lin, H., Müller-Bardorff, M., Gathmann, B., Brieke, J., Mothes-Lasch, M., Bruchmann, M., Miltner, W. H. R., & Straube, T. (2020). Stimulus arousal drives amygdalar responses to emotional expressions across sensory modalities. *Scientific Reports*, 10(1), 1898. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58839-1>
- Lin, J. J., Riley, J. D., Juranek, J., & Cramer, S. C. (2008). Vulnerability of the frontal-temporal connections in temporal lobe epilepsy. *Epilepsy Research*, 82(2-3), 162-170. <https://doi.org/10.1016/j.eplesyres.2008.07.020>
- Lin, Y.-H., Dhanaraj, V., Mackenzie, A. E., Young, I. M., Tanglay, O., Briggs, R. G., Chakraborty, A. R., Hormovas, J., Fonseka, R. D., Kim, S. J., Yeung, J. T., Teo, C., & Sughrue, M. E. (2021). Anatomy and White Matter Connections of the Parahippocampal Gyrus. *World Neurosurgery*, 148, e218-e226. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.12.136>
- LoGalbo, A., Sawrie, S., Roth, D. L., Kuzniecky, R., Knowlton, R., Faught, E., & Martin, R. (2005). Verbal memory outcome in patients with normal preoperative verbal memory and left mesial temporal sclerosis. *Epilepsy & Behavior*, 6(3), 337-341. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2004.12.010>

- Lundqvist, L.-O., Carlsson, F., Hilmersson, P., & Juslin, P. N. (2009). Emotional responses to music : Experience, expression, and physiology. *Psychology of Music*, 37(1), 61-90. <https://doi.org/10.1177/0305735607086048>
- Maguire, M. J. (2012). Music and epilepsy : A critical review. *Epilepsia*, 53(6), 947-961. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2012.03523.x>
- Majdan, A., Sziklas, V., & Jones-Gotman, M. (1996). Performance of healthy subjects and patients with resection from the anterior temporal lobe on matched tests of verbal and visuoperceptual learning. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 18(3), 416-430.
- Mameniškienė, R., Puteikis, K., Jasionis, A., & Jatužis, D. (2020). A Review of Accelerated Long-Term Forgetting in Epilepsy. *Brain Sciences*, 10(12), 945. <https://doi.org/10.3390/brainsci10120945>
- Mas-Herrero, E., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2018). Modulating musical reward sensitivity up and down with transcranial magnetic stimulation. *Nature Human Behaviour*, 2(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41562-017-0241-z>
- Mas-Herrero, E., Maini, L., Sescousse, G., & Zatorre, R. J. (2021). Common and distinct neural correlates of music and food-induced pleasure : A coordinate-based meta-analysis of neuroimaging studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 123, 61-71. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.12.008>
- Mas-Herrero, E., Singer, N., Ferreri, L., McPhee, M., Zatorre, R., & Ripolles, P. (2020). *Rock 'n' Roll but not Sex or Drugs : Music is negatively correlated to depressive symptoms during the COVID-19 pandemic via reward-related mechanisms* [Preprint]. PsyArXiv. <https://doi.org/10.31234/osf.io/x5upn>
- Mather, M., & Sutherland, M. R. (2011). Arousal-Biased Competition in Perception and Memory. *Perspectives on Psychological Science*, 6(2), 114-133. <https://doi.org/10.1177/1745691611400234>
- Mathon, B., Bielle, F., Samson, S., Plaisant, O., Dupont, S., Bertrand, A., Miles, R., Nguyen-Michel, V.-H., Lambrecq, V., Calderon-Garcidueñas, A. L., Duyckaerts, C., Carpentier, A., Baulac, M., Cornu, P., Adam, C., Clemenceau, S., & Navarro, V. (2017). Predictive factors of long-term outcomes of surgery for mesial temporal lobe epilepsy associated

- with hippocampal sclerosis. *Epilepsia*, 58(8), 1473-1485.  
<https://doi.org/10.1111/epi.13831>
- Mathon, B., & Clemenceau, S. (2022). Surgery procedures in temporal lobe epilepsies. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 187, p. 531-556). Elsevier.
- Mayes, A. R., Hunkin, N. M., Isaac, C., & Muhler, N. (2019). Are there distinct forms of accelerated forgetting and, if so, why? *Cortex*, 110, 115-126.  
<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.04.005>
- McGaugh, J. L. (2018). Emotional arousal regulation of memory consolidation. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 19, 55-60.  
<https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.10.003>
- Meletti, S., Benuzzi, F., Cantalupo, G., Rubboli, G., Tassinari, C. A., & Nichelli, P. (2009). Facial emotion recognition impairment in chronic temporal lobe epilepsy. *Epilepsia*, 50(6), 1547-1559. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2008.01978.x>
- Meletti, S., Benuzzi, F., Nichelli, P., & Tassinari, C. A. (2003). Damage to the Right Hippocampal-Amygdala Formation during Early Infancy and Recognition of Fearful Faces: Neuropsychological and fMRI Evidence in Subjects with Temporal Lobe Epilepsy. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1000(1), 385-388.  
<https://doi.org/10.1196/annals.1280.036>
- Melgire, M., Ragot, R., Samson, S., Penney, T. B., Meck, W. H., Meck, W. H., & Pouthas, V. (2005). Auditory/visual duration bisection in patients with left or right medial-temporal lobe resection. *Brain and Cognition*, 58(1), 119-124.  
<https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.09.013>
- Menon, V., & Levitin, D. J. (2005). The rewards of music listening: Response and physiological connectivity of the mesolimbic system. *NeuroImage*, 28(1), 175-184.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.05.053>
- Merrett, D. L., & Wilson, S. J. (2012). Music and neural plasticity. In N. Rickard & K. McFerran, *Lifelong engagement with music: Benefits for mental health and well-being* (p. 121-161). Nova Science Publishers Inc.
- Meyer, M. (1903). Experimental Studies in the Psychology of Music. *The American Journal of Psychology*, 14(3/4), 192. <https://doi.org/10.2307/1412315>

- Michelucci, R., Pasini, E., & Nobile, C. (2009). Lateral temporal lobe epilepsies : Clinical and genetic features. *Epilepsia*, 50(s5), 52-54. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2009.02122.x>
- Mickley Steinmetz, K. R., & Kensinger, E. A. (2008). Emotional valence influences the neural correlates associated with remembering and knowing. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 8(2), 143-152. <https://doi.org/10.3758/CABN.8.2.143>
- Mickley Steinmetz, K. R., & Kensinger, E. A. (2009). The effects of valence and arousal on the neural activity leading to subsequent memory. *Psychophysiology*, 46(6), 1190-1199. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2009.00868.x>
- Milner, B. (1962). Laterality effects in audition. In V. B. Mountcastle, *Interhemispheric Relations and Cerebral Dominance* (p. 177-195). Johns Hopkins. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10008744140/>
- Milner, B. (1966). Amnesia following operation on the temporal lobes. *Neurocase*, 2.
- Milner, B. (1972). Disorders of learning and memory after temporal lobe lesions in man. *Clinical Neurosurgery*, 19, 421-446. [https://doi.org/10.1093/neurosurgery/19.cn\\_suppl\\_1.421](https://doi.org/10.1093/neurosurgery/19.cn_suppl_1.421)
- Milner, B., Kimura, D., & Taylor, L. B. (1965). *Nonverbal auditory learning after frontal or temporal lobectomy in man*. Paper presented at the Eastern Psychological Association annual meeting, Atlantic City, NJ.
- Mirabel, H., Guinet, V., Voltzenlogel, V., Pradier, S., & Hennion, S. (2020). Social cognition in epilepsy : State of the art and perspectives. *Revue Neurologique*, 176(6), 468-479. <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2020.02.010>
- Montagrin, A., Brosch, T., & Sander, D. (2013). Goal conduciveness as a key determinant of memory facilitation. *Emotion*, 13(4), 622-628. <https://doi.org/10.1037/a0033066>
- Monti, G., & Meletti, S. (2015). Emotion recognition in temporal lobe epilepsy : A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 55, 280-293. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.05.009>
- Muhlert, N., Grünewald, R. A., Hunkin, N. M., Reuber, M., Howell, S., Reynders, H., & Isaac, C. L. (2011). Accelerated long-term forgetting in temporal lobe but not idiopathic

- generalised epilepsy. *Neuropsychologia*, 49(9), 2417-2426.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.04.018>
- Murray, R. J., Brosch, T., & Sander, D. (2014). The functional profile of the human amygdala in affective processing : Insights from intracranial recordings. *Cortex*, 60, 10-33.  
<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2014.06.010>
- Murty, V. P., Ritchey, M., Adcock, R. A., & LaBar, K. S. (2010). fMRI studies of successful emotional memory encoding : A quantitative meta-analysis. *Neuropsychologia*, 48(12), 3459-3469. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.07.030>
- Narayanan, J., Duncan, R., Greene, J., Leach, J.-P., Razvi, S., McLean, J., & Evans, J. J. (2012). Accelerated long-term forgetting in temporal lobe epilepsy : Verbal, nonverbal and autobiographical memory. *Epilepsy & Behavior*, 25(4), 622-630.  
<https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2012.06.038>
- Narme, P., Peretz, I., Strub, M.-L., & Ergis, A.-M. (2016). Emotion effects on implicit and explicit musical memory in normal aging. *Psychology and Aging*, 31(8), 902-913.  
<https://doi.org/10.1037/pag0000116>
- Nineuil, C., Dellacherie, D., & Samson, S. (2020). The Impact of Emotion on Musical Long-Term Memory. *Frontiers in Psychology*, 11, 2110.  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.02110>
- Nineuil, C., Dellacherie, D., & Samson, S. (2022). French adaptation of a film music stimulus set : Normative emotional ratings of valence and arousal prompted by music excerpts. *Psychology of Music*, 50(5), 1707-1715. <https://doi.org/10.1177/03057356211050683>
- Ochsner, K. N. (2000). Are affective events richly recollected or simply familiar? The experience and process of recognizing feelings past. *Journal of Experimental Psychology: General*, 129(2), 242-261. <https://doi.org/10.1037//0096-3445.129.2.242>
- Omigie, D., Dellacherie, D., Hasboun, D., Clément, S., Baulac, M., Adam, C., & Samson, S. (2015). Intracranial markers of emotional valence processing and judgments in music. *Cognitive Neuroscience*, 6(1), 16-23. <https://doi.org/10.1080/17588928.2014.988131>
- Omigie, D., Dellacherie, D., Hasboun, D., George, N., Clement, S., Baulac, M., Adam, C., & Samson, S. (2014). An Intracranial EEG Study of the Neural Dynamics of Musical

- Valence Processing. *Cerebral Cortex*, 25(11), 4038-4047.  
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhu118>
- Omigie, D., & Samson, S. (2014). A Protective Effect of Musical Expertise on Cognitive Outcome Following Brain Damage? *Neuropsychology Review*, 24(4), 445-460.  
<https://doi.org/10.1007/s11065-014-9274-5>
- Ono, S. E., de Carvalho Neto, A., Joaquim, M. J. M., Dos Santos, G. R., de Paola, L., & Silvado, C. E. S. (2019). Mesial temporal lobe epilepsy : Revisiting the relation of hippocampal volumetry with memory deficits. *Epilepsy & Behavior: E&B*, 100(Pt A), 106516.  
<https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2019.106516>
- Panksepp, J. (1995). The emotional sources of" chills" induced by music. *Music perception*, 13(2), 171-207.
- Papatzikis, E., Zeba, F., Särkämö, T., Ramirez, R., Grau-Sánchez, J., Tervaniemi, M., & Loewy, J. (2020). Mitigating the Impact of the Novel Coronavirus Pandemic on Neuroscience and Music Research Protocols in Clinical Populations. *Frontiers in Psychology*, 11, 2160. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.02160>
- Payne, J. D., Stickgold, R., Swanberg, K., & Kensinger, E. A. (2008). Sleep Preferentially Enhances Memory for Emotional Components of Scenes. *Psychological Science*, 19(8), 781-788. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2008.02157.x>
- Penfield, W., & Jasper, H. (1954). *Epilepsy and the functional anatomy of the human brain*. Little Brown.
- Penfield, W., & Milner, B. (1958). Memory Deficit Produced by Bilateral Lesions in the Hippocampal Zone. *A.M.A. Archives of Neurology & Psychiatry*, 79(5), 475-497.  
<https://doi.org/10.1001/archneurpsyc.1958.02340050003001>
- Penfield, W., & Perot, P. (1963). The brain's record of auditory and visual experience : A final summary and discussion. *Brain*, 86(4), 595-696.
- Perbal, S., Ehrlé, N., Samson, S., Baulac, M., & Pouthas, V. (2001). Time estimation in patients with right or left medial-temporal lobe resection: *Neuroreport*, 12(5), 939-942.  
<https://doi.org/10.1097/00001756-200104170-00015>

- Peretz, I., Aubé, W., & Armony, J. L. (2010). Toward a neurobiology of musical emotions. In E. Altenmüller, S. Schmidt, & E. Zimmermann (Éds.), *Evolution of Emotional Communication* (p. 277-299). Oxford University Press.  
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199583560.003.0017>
- Peretz, I., Gaudreau, D., & Bonnel, A.-M. (1998). Exposure effects on music preference and recognition. *Memory & Cognition*, 26(5), 884-902.  
<https://doi.org/10.3758/BF03201171>
- Phelps, E. A. (2004). Human emotion and memory : Interactions of the amygdala and hippocampal complex. *Current Opinion in Neurobiology*, 14(2), 198-202.  
<https://doi.org/10.1016/j.conb.2004.03.015>
- Phelps, E. A., Labar, K. S., Anderson, A. K., O'connor, K. J., Fulbright, R. K., & Spencer, D. D. (1998). Specifying the Contributions of the Human Amygdala to Emotional Memory : A Case Study. *Neurocase*, 4(6), 527-540.  
<https://doi.org/10.1080/13554799808410645>
- Phelps, E. A., LaBar, K. S., & Spencer, D. D. (1997). Memory for Emotional Words Following Unilateral Temporal Lobectomy. *Brain and Cognition*, 35(1), 85-109.  
<https://doi.org/10.1006/brcg.1997.0929>
- Phelps, E. A., & LeDoux, J. E. (2005). Contributions of the Amygdala to Emotion Processing : From Animal Models to Human Behavior. *Neuron*, 48(2), 175-187.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2005.09.025>
- Phuong, T. H., Houot, M., Méré, M., Denos, M., Samson, S., & Dupont, S. (2020). Cognitive impairment in temporal lobe epilepsy : Contributions of lesion, localization and lateralization. *Journal of Neurology*. <https://doi.org/10.1007/s00415-020-10307-6>
- Pierce, B. H., & Kensinger, E. A. (2011). Effects of emotion on associative recognition : Valence and retention interval matter. *Emotion*, 11(1), 139-144.  
<https://doi.org/10.1037/a0021287>
- Pool, E., Brosch, T., Delplanque, S., & Sander, D. (2016). Attentional bias for positive emotional stimuli : A meta-analytic investigation. *Psychological Bulletin*, 142(1), 79-106. <https://doi.org/10.1037/bul0000026>

- Pouliot, S., & Jones-Gotman, M. (2008). Medial temporal-lobe damage and memory for emotionally arousing odors. *Neuropsychologia*, 46(4), 1124-1134. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.10.017>
- Pratto, F., & John, O. P. (1991). Automatic vigilance : The attention-grabbing power of negative social information. *Journal of Personality and Social Psychology*, 61(3), 380-391. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.61.3.380>
- Qui est concerné par la maladie ?* (2022). Fondation Française pour la Recherche sur l'Épilepsie. <https://www.fondation-epilepsie.fr/comprendre-lepilepsie/qui-est-concerne-par-la-maladie/>
- Ranganath, C., & Ritchey, M. (2012). Two cortical systems for memory-guided behaviour. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(10), 713-726. <https://doi.org/10.1038/nrn3338>
- Rayner, G., Jackson, G. D., & Wilson, S. J. (2016). Two distinct symptom-based phenotypes of depression in epilepsy yield specific clinical and etiological insights. *Epilepsy & Behavior*, 64, 336-344. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2016.06.007>
- Richardson, M. P., Strange, B. A., & Dolan, R. J. (2004). Encoding of emotional memories depends on amygdala and hippocampus and their interactions. *Nature Neuroscience*, 7(3), 278-285. <https://doi.org/10.1038/nn1190>
- Ripollés, P., Ferreri, L., Mas-Herrero, E., Alicart, H., Gómez-Andrés, A., Marco-Pallares, J., Antonijoan, R. M., Noesselt, T., Valle, M., Riba, J., & Rodríguez-Fornells, A. (2018). Intrinsically regulated learning is modulated by synaptic dopamine signaling. *ELife*, 7, e38113. <https://doi.org/10.7554/eLife.38113>
- Ripollés, P., Marco-Pallarés, J., Alicart, H., Tempelmann, C., Rodríguez-Fornells, A., & Noesselt, T. (2016). Intrinsic monitoring of learning success facilitates memory encoding via the activation of the SN/VTA-Hippocampal loop. *eLife*, 5, e17441. <https://doi.org/10.7554/eLife.17441>
- Ritchey, M., Dolcos, F., & Cabeza, R. (2008). Role of Amygdala Connectivity in the Persistence of Emotional Memories Over Time : An Event-Related fMRI Investigation. *Cerebral Cortex*, 18(11), 2494-2504. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhm262>
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of personality and social psychology*, 39(6), 1161.

- Salimpoor, V. N., Benovoy, M., Larcher, K., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2011). Anatomically distinct dopamine release during anticipation and experience of peak emotion to music. *Nature Neuroscience*, 14(2), 257-262. <https://doi.org/10.1038/nn.2726>
- Salimpoor, V. N., van den Bosch, I., Kovacevic, N., McIntosh, A. R., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2013). Interactions Between the Nucleus Accumbens and Auditory Cortices Predict Music Reward Value. *Science*, 340(6129), 216-219. <https://doi.org/10.1126/science.1231059>
- Samson, S. (1999). Musical Function and Temporal Lobe Structures : A review of Brain Lesion Studies. *Journal of New Music Research*, 28(3), 217-228. <https://doi.org/10.1076/jnmr.28.3.217.3107>
- Samson, S. (2014). L'évaluation neuropsychologique dans la chirurgie de l'épilepsie. In X. Seron & M. Van der Linden, *Traité de neuropsychologie clinique de l'adulte* (p. 619-635). De Boeck-Solal. <https://doi.org/10.32258>
- Samson, S., & Dellacherie, D. (2013). Le cerveau au coeur de l'alchimie des émotions musicales. In H. Platel & C. Thomas-Antérion, *Neuropsychologie et art* (p. 33-51). Editions Solal.
- Samson, S., Dellacherie, D., & Platel, H. (2009). Emotional Power of Music in Patients with Memory Disorders : Clinical Implications of Cognitive Neuroscience. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169(1), 245-255. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04555.x>
- Samson, S., & Denos, M. (2022). Neuropsychology of temporal lobe epilepsies. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 187, p. 519-529). Elsevier.
- Samson, S., Ehrlé, N., & Baulac, M. (2001). Cerebral Substrates for Musical Temporal Processes. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 930(1), 166-178.
- Samson, S., & Peretz, I. (2005). Effects of Prior Exposure on Music Liking and Recognition in Patients with Temporal Lobe Lesions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060(1), 419-428. <https://doi.org/10.1196/annals.1360.035>
- Samson, S., & Zatorre, R. J. (1988). Melodic and harmonic discrimination following unilateral cerebral excision. *Brain and Cognition*, 7(3), 348-360. [https://doi.org/10.1016/0278-2626\(88\)90008-5](https://doi.org/10.1016/0278-2626(88)90008-5)

- Samson, S., & Zatorre, R. J. (1991). Recognition memory for text and melody of songs after unilateral temporal lobe lesion : Evidence for dual encoding. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17(4), 793.
- Samson, S., & Zatorre, R. J. (1992). Learning and retention of melodic and verbal information after unilateral temporal lobectomy. *Neuropsychologia*, 30(9), 815-826. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(92\)90085-Z](https://doi.org/10.1016/0028-3932(92)90085-Z)
- Samson, S., & Zatorre, R. J. (1994). Contribution of the right temporal lobe to musical timbre discrimination. *Neuropsychologia*, 32(2), 231-240. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(94\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0028-3932(94)90008-6)
- Samson, S., Zatorre, R. J., & Ramsay, J. O. (2002). Deficits of musical timbre perception after unilateral temporal-lobe lesion revealed with multidimensional scaling. *Brain*, 125(3), 511-523.
- Särkämö, T., Tervaniemi, M., & Huotilainen, M. (2013). Music perception and cognition : Development, neural basis, and rehabilitative use of music. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 4(4), 441-451. <https://doi.org/10.1002/wcs.1237>
- Sassenberg, K., & Ditrich, L. (2019). Research in Social Psychology Changed Between 2011 and 2016 : Larger Sample Sizes, More Self-Report Measures, and More Online Studies. *Advances in Methods and Practices in Psychological Science*, 2(2), 107-114. <https://doi.org/10.1177/2515245919838781>
- Schäfer, T., Sedlmeier, P., Städtler, C., & Huron, D. (2013). The psychological functions of music listening. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2013.00511>
- Scheffer, I. E., Berkovic, S., Capovilla, G., Connolly, M. B., French, J., Guilhoto, L., Hirsch, E., Jain, S., Mathern, G. W., Moshé, S. L., Nordli, D. R., Perucca, E., Tomson, T., Wiebe, S., Zhang, Y., & Zuberi, S. M. (2017). ILAE classification of the epilepsies : Position paper of the ILAE Commission for Classification and Terminology. *Epilepsia*, 58(4), 512-521. <https://doi.org/10.1111/epi.13709>
- Schimmack, U., & Grob, A. (2000). *Dimensional Models of Core Affect : A Quantitative Comparison by Means of Structural Equation Modeling*. 21.

- Schmidt, M. (1996). *Key auditory verbal learning test: A handbook* (Vol. 17). Western Psychological Services Los Angeles, CA.
- Schumann, D., Bayer, J., Talmi, D., & Sommer, T. (2018). Dissociation of immediate and delayed effects of emotional arousal on episodic memory. *Neurobiology of learning and memory*, 148, 11-19.
- Sescousse, G., Caldú, X., Segura, B., & Dreher, J.-C. (2013). Processing of primary and secondary rewards: A quantitative meta-analysis and review of human functional neuroimaging studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(4), 681-696. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.02.002>
- Sharot, T., & Phelps, E. A. (2004). How arousal modulates memory: Disentangling the effects of attention and retention. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 4(3), 294-306. <https://doi.org/10.3758/CABN.4.3.294>
- Sharot, T., Verfaellie, M., & Yonelinas, A. P. (2007). How Emotion Strengthens the Recollective Experience: A Time-Dependent Hippocampal Process. *PLoS ONE*, 2(10), e1068. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001068>
- Sharot, T., & Yonelinas, A. P. (2008). Differential time-dependent effects of emotion on recollective experience and memory for contextual information. *Cognition*, 106(1), 538-547. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.03.002>
- Sherman, E. M. S., Wiebe, S., Fay-McClymont, T. B., Tellez-Zenteno, J., Metcalfe, A., Hernandez-Ronquillo, L., Hader, W. J., & Jetté, N. (2011). Neuropsychological outcomes after epilepsy surgery: Systematic review and pooled estimates. *Epilepsia*, 52(5), 857-869. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2011.03022.x>
- Sihvonen, A. J., Särkämö, T., Leo, V., Tervaniemi, M., Altenmüller, E., & Soinila, S. (2017). Music-based interventions in neurological rehabilitation. *The Lancet Neurology*, 16(8), 648-660. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(17\)30168-0](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(17)30168-0)
- Small, D. M., Gregory, M. D., Mak, Y. E., Gitelman, D., Mesulam, M. M., & Parrish, T. (2003). Dissociation of Neural Representation of Intensity and Affective Valuation in Human Gustation. *Neuron*, 39(4), 701-711. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(03\)00467-7](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00467-7)

- Small, D. M., Zatorre, R. J., Dagher, A., Evans, A. C., & Jones-Gotman, M. (2001). Changes in brain activity related to eating chocolate : From pleasure to aversion. *Brain*, 124(9), 1720-1733. <https://doi.org/10.1093/brain/124.9.1720>
- Smith, N. K., Cacioppo, J. T., Larsen, J. T., & Chartrand, T. L. (2003). May I have your attention, please : Electrocortical responses to positive and negative stimuli. *Neuropsychologia*, 41(2), 171-183. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(02\)00147-1](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(02)00147-1)
- Steiger, B. K., & Jokeit, H. (2017). Why epilepsy challenges social life. *Seizure*, 44, 194-198. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2016.09.008>
- Stewart, L., von Kriegstein, K., Warren, J. D., & Griffiths, T. D. (2006). Music and the brain : Disorders of musical listening. *Brain*, 129(10), 2533-2553. <https://doi.org/10.1093/brain/awl171>
- Tallal, P., Miller, S., & Fitch, R. H. (1993). Neurobiological basis of speech : A case for the preeminence of temporal processing. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 682, 27-47. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1993.tb22957.x>
- Talmi, D. (2013). Enhanced Emotional Memory : Cognitive and Neural Mechanisms. *Current Directions in Psychological Science*, 22(6), 430-436. <https://doi.org/10.1177/0963721413498893>
- Talmi, D., Anderson, A. K., Riggs, L., Caplan, J. B., & Moscovitch, M. (2008). Immediate memory consequences of the effect of emotion on attention to pictures. *Learning & Memory*, 15(3), 172-182. <https://doi.org/10.1101/lm.722908>
- Talmi, D., Schimmack, U., Paterson, T., & Moscovitch, M. (2007). The role of attention and relatedness in emotionally enhanced memory. *Emotion*, 7(1), 89-102. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.7.1.89>
- Tanaka, A., Akamatsu, N., Yamano, M., Nakagawa, M., Kawamura, M., & Tsuji, S. (2013). A more realistic approach, using dynamic stimuli, to test facial emotion recognition impairment in temporal lobe epilepsy. *Epilepsy & Behavior*, 28(1), 12-16. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2013.03.022>
- Tellez-Zenteno, J. F., Patten, S. B., Jetté, N., Williams, J., & Wiebe, S. (2007). Psychiatric Comorbidity in Epilepsy : A Population-Based Analysis. *Epilepsia*, 48(12), 2336-2344. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2007.01222.x>

- Thivard, L., Tanguy, M.-L., Adam, C., Clémenceau, S., Dezamis, E., Lehericy, S., Dormont, D., Chiras, J., Baulac, M., & Dupont, S. (2007). Postoperative Recovery of Hippocampal Contralateral Diffusivity in Medial Temporal Lobe Epilepsy. *Epilepsia*, 48(3), 599-604. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2006.00968.x>
- Tierney, A. T., Bergeson, T. R., & Pisoni, D. B. (2008). Effects of Early Musical Experience on Auditory Sequence Memory. *Empirical Musicology Review*, 3(4), 178-186. <https://doi.org/10.18061/1811/35989>
- Tramoni, E., Felician, O., Barbeau, E. J., Guedj, E., Guye, M., Bartolomei, F., & Ceccaldi, M. (2011). Long-term consolidation of declarative memory : Insight from temporal lobe epilepsy. *Brain*, 134(3), 816-831. <https://doi.org/10.1093/brain/awr002>
- Tramoni-Negre, E., Lambert, I., Bartolomei, F., & Felician, O. (2017). Long-term memory deficits in temporal lobe epilepsy. *Revue Neurologique*, 173(7-8), 490-497. <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2017.06.011>
- Trost, W., Ethofer, T., Zentner, M., & Vuilleumier, P. (2012). Mapping Aesthetic Musical Emotions in the Brain. *Cerebral Cortex*, 22(12), 2769-2783. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr353>
- Trost, W., Frühholz, S., Cochrane, T., Cojan, Y., & Vuilleumier, P. (2015). Temporal dynamics of musical emotions examined through intersubject synchrony of brain activity. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 10(12), 1705-1721. <https://doi.org/10.1093/scan/nsv060>
- Trujillo-Pozo, I., Martín-Monzón, I., & Rodríguez-Romero, R. (2013). Brain lateralization and neural plasticity for musical and cognitive abilities in an epileptic musician. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00829>
- Vaughan, D. N., Rayner, G., Tailby, C., & Jackson, G. D. (2016). MRI-negative temporal lobe epilepsy : A network disorder of neocortical connectivity. *Neurology*, 87(18), 1934-1942. <https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000003289>
- Vieillard, S., & Gilet, A.-L. (2013). Age-related differences in affective responses to and memory for emotions conveyed by music : A cross-sectional study. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00711>

- Vieillard, S., Peretz, I., Gosselin, N., Khalfa, S., Gagnon, L., & Bouchard, B. (2008). Happy, sad, scary and peaceful musical excerpts for research on emotions. *Cognition & Emotion*, 22(4), 720-752. <https://doi.org/10.1080/02699930701503567>
- Vuilleumier, P., & Trost, W. (2015). Music and emotions : From enchantment to entrainment: Musical emotions and entrainment. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1337(1), 212-222. <https://doi.org/10.1111/nyas.12676>
- Wagner, U., Hallschmid, M., Rasch, B., & Born, J. (2006). Brief Sleep After Learning Keeps Emotional Memories Alive for Years. *Biological Psychiatry*, 60(7), 788-790. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2006.03.061>
- Wan, C. Y., & Schlaug, G. (2010). Music Making as a Tool for Promoting Brain Plasticity across the Life Span. *The Neuroscientist*, 16(5), 566-577. <https://doi.org/10.1177/1073858410377805>
- Waring, J. D., & Kensinger, E. A. (2009). Effects of emotional valence and arousal upon memory trade-offs with aging. *Psychology and Aging*, 24(2), 412-422. <https://doi.org/10.1037/a0015526>
- Waring, J. D., & Kensinger, E. A. (2011). How emotion leads to selective memory : Neuroimaging evidence. *Neuropsychologia*, 49(7), 1831-1842. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.03.007>
- Watanabe, T., Yagishita, S., & Kikyo, H. (2008). Memory of music : Roles of right hippocampus and left inferior frontal gyrus. *NeuroImage*, 39(1), 483-491. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.08.024>
- Wieser, H. G., & Walter, R. (1997). Untroubled musical judgement of a performing organist during early epileptic seizure of the right temporal lobe. *Neuropsychologia*, 35(1), 45-51.
- Wilkinson, H., Holdstock, J. S., Baker, G., Herbert, A., Clague, F., & Downes, J. J. (2012). Long-term accelerated forgetting of verbal and non-verbal information in temporal lobe epilepsy. *Cortex*, 48(3), 317-332. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.01.002>
- Williamson, P. D., & Engel, J. (2008). Anatomic classification of focal epilepsies. *Epilepsy: A Comprehensive Textbook*. 2nd ed. Philadelphia, PA: Wolters Kluwer Lippincott Williams & Wilkins, 2465-2477.

- Wilson, S. J., Abbott, D. F., Tailby, C., Gentle, E. C., Merrett, D. L., & Jackson, G. D. (2013). Changes in singing performance and fMRI activation following right temporal lobe surgery. *Cortex*, 49(9), 2512-2524. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.12.019>
- Witt, J.-A., Coras, R., Schramm, J., Becker, A. J., Elger, C. E., Blümcke, I., & Helmstaedter, C. (2015). Relevance of hippocampal integrity for memory outcome after surgical treatment of mesial temporal lobe epilepsy. *Journal of Neurology*, 262(10), 2214-2224. <https://doi.org/10.1007/s00415-015-7831-3>
- Yonelinas, A. P., & Ritchey, M. (2015). The slow forgetting of emotional episodic memories : An emotional binding account. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(5), 259-267. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.02.009>
- Zatorre, R. J. (1985). Discrimination and recognition of tonal melodies after unilateral cerebral excisions. *Neuropsychologia*, 23(1), 31-41.
- Zatorre, R. J. (1988). Pitch perception of complex tones and human temporal-lobe function. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(2), 566-572.
- Zatorre, R. J., & Baum, S. R. (2012). Musical Melody and Speech Intonation : Singing a Different Tune. *PLoS Biology*, 10(7), e1001372. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001372>
- Zatorre, R. J., Belin, P., & Penhune, V. B. (2002). Structure and function of auditory cortex : Music and speech. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(1), 37-46. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01816-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01816-7)
- Zatorre, R. J., Chen, J. L., & Penhune, V. B. (2007). When the brain plays music : Auditory–motor interactions in music perception and production. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(7), 547-558. <https://doi.org/10.1038/nrn2152>
- Zatorre, R. J., Evans, A., & Meyer, E. (1994). Neural mechanisms underlying melodic perception and memory for pitch. *The Journal of Neuroscience*, 14(4), 1908-1919. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.14-04-01908.1994>
- Zatorre, R. J., & Halpern, A. R. (1993). Effect of unilateral temporal-lobe excision on perception and imagery of songs. *Neuropsychologia*, 31(3), 221-232. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(93\)90086-F](https://doi.org/10.1016/0028-3932(93)90086-F)

- Zentner, M., Grandjean, D., & Scherer, K. R. (2008). Emotions evoked by the sound of music : Characterization, classification, and measurement. *Emotion*, 8(4), 494-521. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.8.4.494>
- Zhao, F., Kang, H., You, Li., Rastogi, P., Venkatesh, D., & Chandra, M. (2014). Neuropsychological deficits in temporal lobe epilepsy : A comprehensive review. *Annals of Indian Academy of Neurology*, 17(4), 374-382. <https://doi.org/10.4103/0972-2327.144003>





De nombreuses études ont révélé un bénéfice des émotions sur le mémoire résultant en partie de l'intégrité du lobe temporal médian et notamment des connexions amygdalo-hippocampiques. Cependant, ce bénéfice a majoritairement été étudié avec des images ou des mots. Or, en tant qu'activité humaine agréable et capable de générer des émotions fortes et variées, la musique semble être un support privilégié pour explorer cette question. De plus, bien qu'une partie de la littérature ait étudié les effets des émotions sur la mémoire selon l'approche dimensionnelle (i.e., arousal et valence émotionnelle), les deux dimensions n'ont pas toujours été conjointement manipulées et leur interaction n'a été que rarement testée. Enfin, peu d'études ont modulé les délais séparant la présentation des stimuli émotionnels et les tâches de mémoire afin d'étudier l'impact des émotions sur le processus de consolidation mnésique. Pourtant, le rehaussement émotionnel de la mémoire s'accroîtrait avec l'allongement du délai suggérant l'effet bénéfique des émotions sur le processus de consolidation. L'objectif de cette thèse est d'évaluer l'impact des dimensions émotionnelles sur la mémoire musicale et ainsi de mieux comprendre le rôle du lobe temporal dans le processus de consolidation des informations musicales en étudiant les performances de patients ayant bénéficié d'une résection du lobe temporal médian et de volontaires sains. Pour cela, nous avons testé l'impact des dimensions émotionnelles sur la mémoire musicale chez une population d'adultes sains (**Article I**). Les extraits musicaux étaient mieux reconnus après un délai de 24 heures qu'après un délai de 15 minutes, suggérant que les émotions musicales, notamment la valence positive, permettaient de renforcer la consolidation mnésique. Puis, afin de disposer d'un matériel musical générant des émotions fortes et variées, nous avons validé les jugements émotionnels associés à des extraits de musiques de films auprès de la population française (**Article II**). Ce matériel a ensuite été utilisé pour évaluer l'effet d'une lésion du lobe temporal médian sur la mémoire d'extraits musicaux (**Article III**). Un effet de la valence positive a été retrouvé sur les performances mnésiques des patients ainsi qu'un effet de l'arousal élevé, malgré la présence d'une lésion de l'amygdale. Des analyses complémentaires suggèrent que la mémoire musicale de ces patients semble relativement préservée par rapport à la mémoire verbale ou visuelle, mais uniquement lorsque le délai séparant la phase d'encodage et la phase de reconnaissance est court. Enfin, l'analyse d'une importante base de données nous a permis d'aborder les émotions sous un angle différent. En étudiant l'impact d'une épilepsie du lobe temporal sur le traitement émotionnel (**Article IV**), nous avons pu confirmer que ces patients présentaient un déficit de reconnaissance des expressions faciales émotionnelles et apporter des preuves sur l'importance de prendre en compte certaines variables cliniques dont la localisation du foyer épileptique dans les études examinant les traitements émotionnels. Ce travail a apporté de nouvelles données sur les effets de l'arousal élevé et de la valence positive sur la mémoire musicale et l'implication du lobe temporal médian dans le processus de consolidation. La poursuite de ces travaux nous permettra de mieux comprendre l'éventuel bénéfice des émotions sur la mémoire musicale de ces patients et d'envisager des prises en charge musicales auprès de cette population clinique.

**Mot clés :** émotion – mémoire - musicale – consolidation – arousal – valence