

Université de Montréal

**Étude des rythmes cérébraux dans la régulation émotionnelle à l'aide d'un  
électroencéphalogramme quantitatif**

Par  
Inès Zouaoui

Département de psychologie, Faculté des Arts et des Sciences

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Maîtrise de recherche (M.Sc)  
en Psychologie

Août 2022

© Inès Zouaoui, 2022

Université de Montréal

Département de psychologie, Faculté des Arts et des Sciences

---

*Ce mémoire intitulé*

**Étude des rythmes cérébraux dans la régulation émotionnelle à l'aide d'un  
électroencéphalogramme quantitatif**

*Présenté par*

**Inès Zouaoui**

*A été évalué(e) par un jury composé des personnes suivantes*

**Sébastien Hétu**

Président-rapporteur

**Marc Lavoie**

Directeur de recherche

**Alexandru Hanganu**

Membre du jury

## Résumé

**Contexte :** La régulation émotionnelle est un ensemble de processus responsables du contrôle, de l'évaluation et de l'ajustement des émotions dans un objectif. Les résultats d'imagerie fonctionnelle s'accordent sur l'implication des structures frontales et limbiques tandis que les résultats en neurophysiologie, encore rares, suggèrent un rôle du rythme alpha dans l'induction émotionnelle et du rythme thêta dans la régulation. **Objectifs et hypothèses :** Notre objectif était d'étudier le rythme thêta et alpha pendant la réévaluation de stimuli déplaisants. Nous avons émis l'hypothèse que l'activité alpha serait modulée lors de l'induction émotionnelle seulement tandis que l'activité thêta préfrontale serait positivement corrélée à une régulation réussie. **Méthode :** Vingt-quatre participants sains ont été enregistrés avec 64 électrodes EEG alors qu'ils regardaient passivement ou réévaluaient des images négatives et neutres. Les rythmes thêta et alpha ont été comparés lors de l'induction émotionnelle puis dans les conditions de maintien, de diminution et d'augmentation de l'émotion, et une localisation de la source a estimé les générateurs. **Résultats :** Le rythme alpha était non sensible à l'induction et à la régulation. L'activité thêta était systématiquement plus élevée dans la condition de régulation à la hausse que dans la condition de maintien ( $p=.04$ ) principalement au début de la régulation (1-3 sec) pour thêta bas et plus tard (5-7 sec) pour le thêta haut avec comme générateur du thêta bas le gyrus frontal moyen et le cortex cingulaire antérieur dorsal. **Conclusion :** Le rythme thêta était impliqué dans les processus de réévaluation à la hausse de l'émotion.

*Mots-clés :* régulation émotionnelle ; réévaluation cognitive ; EEG thêta ; EEG alpha ; sLORETA

## Abstract

**Context:** Emotion regulation is a set of processes responsible for controlling, evaluating and adjusting reactions to achieve a goal. Results derived from magnetic resonance imaging agreed on the involvement of frontal and limbic structures in this process. Findings using cognition and physiology interactions are still scarce but suggest a role for alpha rhythm in emotional induction and theta in regulation. **Objectives and hypotheses:** Our goal was to investigate theta and alpha rhythm during the reappraisal of aversive stimuli. We hypothesized that an implication of alpha rhythm in emotional induction only and an increase in prefrontal theta rhythm positively correlated with successful regulation. **Method:** Twenty-four healthy participants were recorded with 64 EEG electrodes while asked to passively watch or reappraise negative pictures. Theta and alpha rhythms were compared across maintain, decrease and increase regulation conditions, and a source localization estimated the generators. **Results:** Theta activity was consistently higher in the upregulation than in the maintenance condition ( $p=.04$ ) for the entire control period, but mainly at the beginning of regulation (1-3 sec) for low-theta and later (5-7 sec) for high-theta. Moreover, our results confirm that a low-theta generator correlated with mainly the middle frontal gyrus and the dorsal anterior cingulate cortex during upregulation. Theta was sensitive to emotion upregulation, whereas the alpha oscillation was non-sensitive to emotion induction and regulation. **Conclusion:** The low-theta rhythm was involved explicitly in emotion upregulation processes that occur at a definite time during reappraisal, whereas the alpha rhythm was not altered by emotion induction and regulation.

*Keywords:* emotion regulation; cognitive reappraisal; EEG theta; EEG alpha; sLORETA

## Table des matières

Résumé .....	3
Abstract .....	4
Liste des tableaux .....	7
Liste des figures .....	8
Liste des sigles et abréviations .....	9
Remerciements .....	10
Chapitre I. Introduction .....	11
1.1. La régulation émotionnelle .....	11
1.1.1 Définition .....	11
1.1.2. Le modèle des processus composants .....	14
1.1.3. Neuroanatomie de la réévaluation cognitive .....	18
1.2. Les rythmes cérébraux, les cognitions et les émotions.....	21
1.2.2. Histoire et genèse de l'EEG .....	21
1.2.3. Rythmes cérébraux et EEG quantitatif.....	22
1.2.4. Rythmes cérébraux et régulation émotionnelle.....	25
1.3. Objectifs et hypothèses .....	28
Chapitre II. Article en soumission dans la revue Emotion.....	31
Chapitre III. Discussion.....	59
3.1. Discussion générale .....	59
3.1.1. Synthèse des résultats.....	59
3.1.2. Spécificité de thêta dans la régulation émotionnelle à la hausse : réévaluation cognitive et déploiement attentionnel .....	60
3.1.3. Localisation des sources génératrices .....	63
3.1.4. Lien entre les données EEG et le succès de la régulation émotionnelle .....	64
3.1.5. Rythme thêta lors de l'induction des émotions .....	65
3.1.6. Rythme alpha dans la régulation émotionnelle .....	66
3.2. Limites et orientations futures .....	69
3.2.1. Limites méthodologiques .....	69
3.2.2. Populations cliniques.....	70
3.2.3. Autres rythmes cérébraux.....	72

3.2.4. Techniques d'acquisition et connectivité .....	73
Chapitre IV. Conclusion.....	74
Bibliographie.....	75
APPENDICE A.....	101
APPENDICE B .....	103
APPENDICE C .....	105
APPENDICE D.....	107
APPENDICE E .....	110
APPENDICE F.....	112
APPENDICE G.....	114

## Liste des tableaux

**Dans l'article « Alpha and Theta oscillations during the cognitive reappraisal of aversive pictures: a Spatio-temporal qEEG analysis »**

<b>Table 1.</b> Characteristics of the participants .....	44
<b>Table 2.</b> The intensity of aversion pre-post regulation based on behavioral evaluation of emotion regulation.....	46
<b>Table 3.</b> Average success frequency according to the regulation instruction 'maintain', 'decrease', 'increase' .....	46

## Liste des figures

### Directement dans le mémoire

**Figure 1.** Diagramme schématique représentant le Modèle des processus composants (inspiré de Gross (1998, 2015))..... 15

### Dans l'article soumis

**Figure 2.** Low Theta (Panel A), High Theta (Panel B) and Alpha (Panel C) power spectral amplitude in response to each regulation condition (maintain, decrease, increase) for negative pictures in function of baseline, induction and regulation segments showing a larger theta power during the increase regulation condition compared to the maintain and decrease. .... 49

**Figure 3.** Scalp topography of the EEG activities contrasts negative – neutral pictures during induction for low theta (3 – 5.5 Hz), high theta (5.5 – 8 Hz) and alpha (8 - 13 Hz). .... 50

**Figure 4.** Scalp topography distribution of the increase–maintain contrast (panel A) and decrease –maintain contrast (panel B) for the 1-3s, 3-5s and 5-7s post-regulation phases for low theta (3 – 5.5 Hz), high theta (5.5 – 8 Hz) and alpha (8 - 13 Hz). .... 50

**Figure 5.** The yellow area represents voxels with the greater significance of low theta during the emotion regulation between 1 to 3 sec with increase > maintain, located in the middle frontal gyrus (MNI coordinates [x, y, z = 35, 60, -10], Brodmann area 10 (threshold t-stats = 14.28,  $p < 0.05$ )..... 51

**Figure 6.** The yellow area represents voxels with more significant correlations between low theta during the emotion regulation between 1 to 3 sec with increase > maintain and the success of regulation during the task, located in the middle frontal gyrus (Panel A); MNI coordinates [x, y, z = -15, 30, 30], Brodmann area 32 ( $r = .57$ ,  $p = 0.035$ ) and the paracentral lobule (Panel B; MNI coordinates [x, y, z = -15, -40, 50], Brodmann area 5 ( $r = .60$ ,  $p = 0.035$ ). .... 53

## Liste des sigles et abréviations

B.A. : Brodmann's areas

CERQ : Cognitive Emotion Regulation Questionnaire

DSP : Digital signal processing

EEG : Electroencéphalographie ; electroencephalography

EEGq : Electroencéphalographie quantitative

ERP : Evoked-related potential

FFT : Fast Fourier Transform

fMRI : functional Magnetic resonance imaging

IAPS : International Affective Picture System

IRMf : Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

LORETA : Low Resolution Brain Electromagnetic Tomography

LPP : Late positive potential

M : Mean

MEG : Magnétoencéphalographie ; magnetoencephalography

ANOVA : Analysis of variance

MNI : Montreal Neurological Institute

N : Number of participants

PET : Positron emission tomography

PHQ-9 : Patient Health Questionnaire Mood Scale

SAM-Test : Self-Assessment Manikin Test

SD : Standard deviation

SnPM: Statistical non-parametric mapping

sLORETA : standardized Low resolution brain electromagnetic tomography

STAI : State-Trait Anxiety Inventory

TEP : Tomographie par émission de positron

qEEG : quantitative Electroencephalography

## Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont accompagnée de près ou de loin pour mener à bien ce projet.

Tout d'abord, un grand merci à Marc Lavoie pour avoir eu confiance en moi et mon projet un peu insensé de venir au Québec en pleine pandémie. Merci de m'avoir encouragée, soutenue et transmis de votre savoir et votre passion tout au long de ma maîtrise. Merci aussi à toute son équipe de recherche, notamment aux personnes qui ont monté ce projet passionnant et collecté les données. Merci à Stéphane Potvin pour son aide dans la correction de l'article. Merci à Catherine Briand et Marie-Josée Drolet de m'avoir offert l'opportunité d'être assistante de recherche dans un beau projet. Cette collaboration a été précieuse dans mon parcours humain et professionnel.

Merci à mes parents et grands-parents de m'avoir épaulée et encouragée à tous les niveaux. Je serai toujours reconnaissante envers votre aide précieuse. Même si mes études ou mes projets ne sont pas toujours entièrement compris, vous me rappelez en permanence que vous êtes fiers de moi. Une pensée à mes ami.es et au reste de ma famille en France que j'ai hâte de revoir. Merci à ma sœur, mon pilier depuis toujours et pour toujours, qui arrive à savoir à distance par télépathie quand j'ai besoin d'être écoutée, rassurée et de prendre du recul pour mieux avancer. Le plus dur de cette maîtrise a été d'être loin de toi.

Et enfin, merci à mes ami.es PASOUD et mon amour d'avoir fait de ma vie au Québec une évidence, une aventure remplie de joie, de spontanéité, de danse et de rires. Et merci la vie !

## Chapitre I. Introduction

### 1.1. La régulation émotionnelle

#### 1.1.1 Définition

Les émotions sont fondamentales pour l'interaction sociale, le développement de la personnalité et constituent un facteur de protection à la psychopathologie (Davidson et al., 2009). Les émotions consistent en des réponses à des événements internes ou externes qui touchent à nos préoccupations et notre bien-être (Frijda, 2017). Elles ne sont pourtant pas toujours souhaitées et adaptées aux demandes situationnelles. Tenter de les maîtriser, les contrôler est alors commun. C'est le cas lorsque nous tentons de dissimuler notre tristesse derrière un sourire, de maîtriser notre colère lors d'une conversation déplaisante, de masquer notre peur devant un film ou encore d'exagérer un rire après une plaisanterie qui n'a pas trouvé son public. Ce mécanisme de régulation émotionnelle est communément défini comme « un ensemble de processus cognitifs responsables du contrôle, de l'évaluation et de l'adaptation de l'intensité et de la durée des réactions émotionnelles » (Ochsner & Gross, 2005). À la différence de la sensibilité émotionnelle qui détermine le début de la réponse émotionnelle, la régulation des émotions permet de contrôler le décalage de la réponse émotionnelle (Koole, 2009). L'intention est de vouloir influencer les émotions en tant qu'états limités dans le temps, en fonction du contexte et de valence positive ou négative.

Lorsqu'on évoque la régulation émotionnelle, on pense souvent à une intention de régulation à la baisse des émotions négatives comme la peur, l'anxiété et le stress. Mais la régulation des émotions comprend aussi la régulation à la hausse et peut s'effectuer sur des émotions ou des stimuli de valence négative comme positive. La régulation à la baisse vise à diminuer l'intensité de l'expérience et l'expression émotionnelle. D'un autre côté, la régulation à la hausse vise à augmenter, amplifier l'expérience et l'expression émotionnelle, et ceci indépendamment de la valence positive ou négative de l'émotion. Comme exprimé dans la définition de Ochsner and Gross (2005), la nature des réactions émotionnelles et donc leur valence peuvent être modifiées, comme lorsque l'on rit nerveusement d'une situation qui fait ressentir de l'embarrât, ainsi que la durée de l'émotion, par exemple en stoppant un rire de bonne foi pour exprimer un air sérieux, car l'environnement exige du silence et de la retenue.

Être capable d'une régulation émotionnelle efficace est souvent caractérisé par une flexibilité cognitive qui permet de répondre aux demandes situationnelles par des réponses spontanées et socialement acceptables (Kotsou et al., 2011). L'efficacité et la nature même du processus varient d'un individu à l'autre et d'une situation à l'autre. Diverses variables influencent la régulation émotionnelle telles que la culture, les expériences de vie précoces, l'âge ou encore le genre (Gross & Thompson, 2007). Aussi, certaines psychopathologies seraient associées à une réduction de la capacité de régulation émotionnelle et de la souplesse d'utilisation de stratégies en fonction de la situation (Eftekhari et al., 2009). La dérégulation émotionnelle est présente dans de nombreux troubles psychiatriques (Gross & Jazaieri, 2014; Sheppes et al., 2015).

Par ailleurs, l'effort de régulation émotionnelle peut ou non se rapprocher du but désiré. En effet, certaines formes de régulation aboutissent à l'état émotionnel que les personnes souhaitent éviter. Cela serait particulièrement vrai lorsqu'une personne tente de chasser une émotion négative dans des situations de stress ou de charge mentale élevée, dans lesquelles il peut être plus bénéfique d'accueillir l'émotion négative plutôt que de lutter (Wegner et al., 1993). Toutefois, il est admis qu'une régulation émotionnelle efficace est essentielle à l'individu. Ceci est vrai tant pour sa santé mentale (Gross & Muñoz, 1995) que pour sa santé physique, notamment en raison des effets négatifs du stress sur l'organisme (Sapolsky, 2007), ainsi que pour entretenir des relations saines avec les autres (Murray, 2005).

Au quotidien, les individus sont exposés en permanence à des stimuli émotionnels internes (comme une douleur) et externes (comme un bruit de klaxon) qui n'aboutissent à des réactions émotionnelles qu'occasionnellement. Bien qu'elle puisse être volontaire et consciente, la régulation des émotions se produirait donc essentiellement en dehors du champ de la conscience et de manière implicite (Braunstein et al., 2017; Davidson, 1998; Koole et al., 2015). Selon cette théorie, la régulation émotionnelle résulterait de l'automatisation de processus initialement volontaires et contrôlés. Dès lors, les personnes s'engageraient presque continuellement dans une forme de régulation émotionnelle et il serait difficile de distinguer conceptuellement la fin d'une émotion et le début de la régulation de celle-ci.

Un cadre multiniveaux, développé par Braunstein et al. (2017), place dans deux dimensions orthogonales, la nature de l'objectif de régulation (allant d'implicite à explicite) et la nature du processus (allant d'automatique à contrôlé). Les processus implicites aident les personnes à décider

de s'engager ou non dans la régulation émotionnelle, à choisir la stratégie et à la mettre en place de manière non consciente (Kooze et al., 2015). La régulation peut aussi s'engager volontairement et de manière consciente. C'est le cas d'une personne qui détournerait volontairement son attention d'un stimulus menaçant par exemple (Langens & Mörth, 2003). Une grande partie des études expérimentales sur la régulation émotionnelle s'appuie sur cet engagement volontaire.

L'idée que l'on puisse modifier nos émotions et non les subir passivement intéresse depuis des milliers d'années (McRae & Gross, 2020). Aussi, l'étude contemporaine de la régulation émotionnelle est précédée par plusieurs courants de pensée. On évoque souvent la pensée psychanalytique, avec notamment le cadre théorique et empirique des mécanismes de défense soutenu par Freud (1946). Les stratégies de défenses de l'ego sont considérées comme les précurseurs des stratégies de régulation présentes dans les modèles contemporains (Gross, 2015). Dans ce cadre théorique, les mécanismes de défense étaient tournés vers la gestion des émotions négatives et de l'anxiété, et incluaient notamment les défenses perceptives contre les stimuli négatifs, le coping, l'intellectualisation et la rationalisation. L'étude du stress et du coping, décrit comme les réactions adaptatives en réponse au stress, se poursuit dans les années 60 avec l'approche psychodynamique (Lazarus & Folkman, 1984). Une première étude montre la diminution des réponses subjectives et physiologiques lorsqu'il est demandé aux participants de visionner un film d'intervention chirurgicale de manière analytique et détachée (Lazarus & Alfert, 1964). Par la suite, le courant de thérapie cognitivo-comportementale s'intéresse aux compétences de régulation émotionnelle et considère leur amélioration comme faisant partie des résultats désirés des thérapies (Beck, 2005; Beck & Dozois, 2011). Également, le domaine de la psychologie développementale s'est intéressé à la gestion des émotions par le prisme de l'auto-régulation. Une étude a montré que pour obtenir une récompense préférée, mais retardée, les enfants étaient capables de reporter la gratification immédiate et persister dans un comportement orienté vers un but ultérieur (Mischel et al., 1989). Le début des années 90 marque l'émergence de l'étude des émotions comme un domaine de recherche à part entière (Campos et al., 1989; Izard, 1990). La notion de processus émotionnels remplace alors les expressions comportementales simples. De même, la régulation émotionnelle est conceptualisée comme un ensemble de processus développementaux (Thompson, 1994).

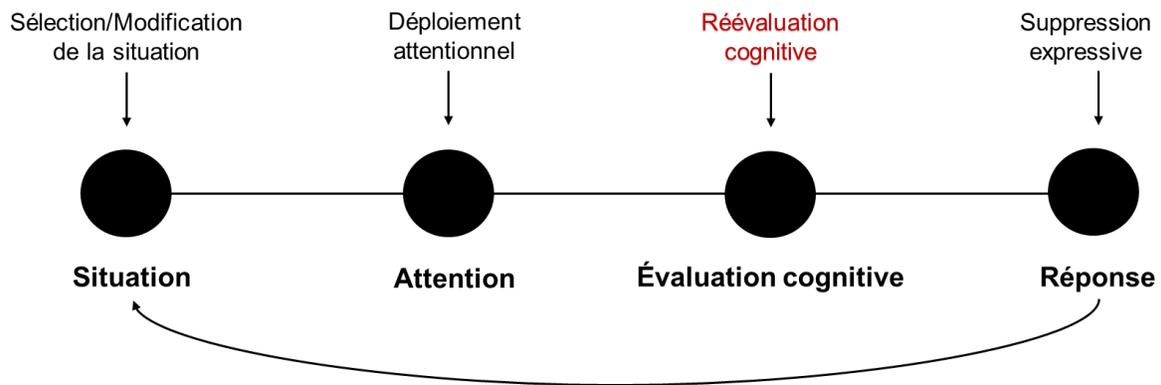
Comme vu dans ce dernier paragraphe, l'étude des mécanismes de régulation émotionnelle a intéressé diverses disciplines, notamment la psychologie clinique, développementale, sociale, cognitive, de la personnalité et plus récemment, avec les avancées en neuroimagerie ; les neurosciences affectives et cognitives et la psychopathologie (Koole, 2009). À ce jour, la recherche s'est principalement concentrée sur la régulation de ses propres émotions (dite régulation intrinsèque). Toutefois, il y a un intérêt grandissant pour la régulation des émotions d'autrui (dite régulation extrinsèque ou interpersonnelle) (Nozaki & Mikolajczak, 2020), ainsi que pour la régulation dans un contexte de groupe (Goldenberg et al., 2016; Porat et al., 2020). La régulation extrinsèque ou interpersonnelle vise à influencer la trajectoire émotionnelle d'autrui et impliquerait deux types de processus. Le premier processus dépendrait de la réponse, c'est-à-dire du retour de la personne, tandis que le second serait indépendant de la réponse, c'est-à-dire sans attente particulière de l'autre (Zaki & Williams, 2013). La régulation dans un contexte de groupe, quant à elle, reposerait sur la catégorisation de l'individu en tant que membre du groupe et surviendrait en réponse à une situation perçue comme pertinente pour le groupe (Goldenberg et al., 2016; Porat et al., 2020).

### ***1.1.2. Le modèle des processus composants***

Depuis l'émergence des neurosciences affectives et cognitives, plusieurs modèles théoriques ont tenté d'identifier les différentes manières dont les individus s'engagent dans la régulation émotionnelle (Davidson et al., 2009). Le Modèle des processus composants ou « Modal Model of Emotion », proposé par Gross (1998, 2015) ; Gross and Thompson (2007), s'appuie sur les modèles d'évaluation ou « appraisal » et décompose l'induction et la régulation des émotions en plusieurs étapes. Le processus d'induction des émotions se ferait en quatre étapes : (a) la survenue d'une situation pertinente (b) la focalisation de l'attention (c) l'évaluation cognitive et (d) la réponse émotionnelle. En parallèle, le modèle définit cinq stratégies de régulation qui interviennent aux différentes étapes de l'induction émotionnelle pour en biaiser le déroulement initial. Il s'agit de (1) la sélection de la situation (2) la modification de la situation (3) le déploiement attentionnel (4) la réévaluation cognitive et enfin (5) la modulation de la réponse (Figure 1). Ces stratégies sont séparées en deux catégories : les stratégies axées sur l'antécédent et les stratégies axées sur la réponse. Les quatre premières stratégies font partie des stratégies axées sur l'antécédent puisqu'elles interviennent avant que la réponse émotionnelle se produise. A

contrario, la modulation de la réponse est une stratégie axée sur la réponse puisqu'elle intervient après la génération de la réponse émotionnelle.

**Figure 1.** Diagramme schématique représentant le Modèle des processus composants (inspiré de Gross [1998, 2015])



Premièrement, la sélection de la situation consiste à choisir de s'exposer à des situations qui pourraient être source d'émotions souhaitées ou non. Prenons l'exemple du visionnement d'un film d'horreur. Dans le cas de l'utilisation de la sélection de la situation, la personne peut choisir de sortir de la salle ou de rester. Peu de recherches ont été faites sur cette stratégie qui reposerait sur des processus cognitifs complexes de génération de scénarios possibles et de prise de décision (Schmidts et al., 2020 ; Webb et al., 2018).

Ensuite, la modification de la situation met en jeu la volonté d'influencer des éléments de l'environnement pour moduler l'impact émotionnel. Elle implique de modifier partiellement l'environnement émotionnel sans l'éviter ou le changer complètement (Van Bockstaele et al., 2020). Pour continuer dans l'exemple du visionnement du film d'horreur, la personne peut choisir de fermer à moitié ses yeux ou se boucher les oreilles. Cette stratégie est la moins opérationnalisée à ce jour notamment en raison de son manque de clarté quant aux processus cognitifs sous-jacents.

Sur un autre plan, le déploiement attentionnel se base sur le déplacement de l'attention vers ou en dehors des stimuli émotionnels. La forme de déploiement attentionnel la plus utilisée dans les paradigmes étudiant la régulation émotionnelle est la distraction. Les participants sont invités à avoir des pensées dirigées vers un état autre que l'émotion provoquée par le stimulus émotionnel

(Thiruchselvam et al., 2011 ; Uusberg et al., 2014). La distanciation est une stratégie qui se situe entre le déploiement attentionnel et la réévaluation et qui consiste à se placer dans une perspective froide et détachée de la situation (Sulpizio et al., 2021). Dans notre exemple, la personne pourrait détourner son attention par distraction vers des friandises ou vers des pensées positives sans rapport avec le film.

Par ailleurs, la réévaluation cognitive est définie comme le fait de changer la façon dont on pense à une situation afin d'en modifier l'impact émotionnel (Gross & Thompson, 2007). La stratégie de réévaluation cognitive la plus classique est la réinterprétation de la signification d'une situation en modifiant la manière dont nous évaluons et analysons celle-ci. Dans notre exemple de film d'horreur, la personne pourrait penser au fait que les personnes sont des acteurs pour diminuer l'émotion de peur, ou au contraire penser que les victimes sont des proches pour augmenter l'intensité de l'émotion négative. Cette forme de régulation émotionnelle est la plus documentée (Buhle et al., 2014). La réévaluation comprend différentes tactiques autres que la réinterprétation, notamment la distanciation, une stratégie entre le déploiement attentionnel et la réévaluation (créer une posture froide de recul par rapport au stimulus), le défi de réalité (changer l'authenticité de la représentation) et enfin, l'acceptation (la justification que des mauvaises choses peuvent se produire) (McRae et al., 2012).

Enfin, la modulation de la réponse consiste en la tentative de contrôle de la réponse émotionnelle une fois l'émotion suscitée. La réponse émotionnelle est caractérisée par des composantes expérientielles, physiologiques et comportementales (Mauss & Robinson, 2009). Plusieurs types de modulation existent tels que la consommation de substances pour modifier l'expérience émotionnelle ou les exercices de respiration pour modifier les composantes physiologiques par exemple. Néanmoins, le plus souvent on pense aux composantes comportementales de suppression expressive ou d'amplification expressive. La suppression expressive est la forme de modulation de la réponse la plus étudiée et consiste en l'inhibition des réponses comportementales par un contrôle moteur (Gross & Thompson, 2007). Dans le cas du film d'horreur, la suppression pourrait impliquer de cacher ses expressions de peur et de contrôler ses sursauts.

Un cadre alternatif, proposé par Koole (2009), considère que la régulation émotionnelle cible trois systèmes générateurs des émotions soit l'attention, les connaissances et les réponses

corporelles. Les stratégies de régulation sont classées en fonction de leurs cibles et de leurs fonctions. Par exemple, il est possible de cibler son attention vers des pensées agréables ou désagréables, son système de connaissance en réévaluant la situation ainsi que son corps en contrôlant ses sursauts ou sa respiration. Ce cadre est plutôt proche du modèle des processus composants, mais explicite plus clairement les cibles et fonctions de chaque stratégie.

La mise en place de protocoles a été déterminante dans l'étude des stratégies de régulation dans le but de spécifier quelles sont les stratégies les plus efficaces et adaptatives quant à l'atteinte d'un objectif. Les stratégies de régulation émotionnelle sont censées être bénéfiques sur la santé mentale et physique sur le long terme (Gross & Thompson, 2007; McRae & Gross, 2020). Néanmoins, toutes les stratégies ne se valent pas. La réévaluation cognitive est considérée comme la meilleure stratégie de par son influence positive sur l'émotion négative autodéclarée (Bebko et al., 2011; Jackson et al., 2000; Nezlek & Kuppens, 2008; Ray et al., 2010). Cette influence se répercute aussi sur la physiologie périphérique comme les contractions des muscles faciaux ou les sursauts (Bebko et al., 2011; Ray et al., 2010) ainsi que les mesures d'activités cérébrales en lien avec les émotions (Hajcak et al., 2010; Moser et al., 2010; Ochsner et al., 2004). Au contraire, la suppression expressive maintiendrait l'émotion négative ou même l'augmenterait, et serait liée à des conséquences cognitives, sociales et affectives négatives (Bebko et al., 2011; Gross & Thompson, 2007; Nezlek & Kuppens, 2008).

Toutefois, l'efficacité de la réévaluation cognitive varie d'un individu à l'autre, par exemple selon le sexe biologique (McRae et al., 2008) ou la présence d'une psychopathologie (Dryman & Heimberg, 2018; O'Driscoll et al., 2014). La réévaluation cognitive est une stratégie efficace qui peut être pratiquée de manière consciente et possède une variabilité interne selon si l'on régule à la baisse ou à la hausse les émotions. Cette stratégie est utilisée dans différentes thérapies, notamment la thérapie cognitivo-comportementale (Beck, 2005) et la thérapie comportementale dialectique (Neacsiu et al., 2014). Il y a aussi la thérapie de régulation émotionnelle (Mennin & Fresco, 2014) dans l'objectif de diminuer les symptômes associés à la dépression ou les troubles anxieux.

Aussi, il est possible d'explicitement cette stratégie et d'augmenter l'expérience subjective en se concentrant sur les aspects négatifs avec une pensée catastrophique ou de diminuer l'expérience subjective en se concentrant sur les aspects positifs. Il est également concevable de créer une

condition plus neutre et de maintenir un état où l'on demandera au participant, par exemple, de continuer à regarder une image avec constance sans essayer de changer le cours de l'émotion (Thompson, 1994). Par conséquent, les études sur la régulation émotionnelle ont le plus souvent utilisé cette stratégie (Buhle et al., 2014). Une meilleure compréhension des processus sous-jacents à la réévaluation cognitive est importante pour la recherche fondamentale et clinique.

### *1.1.3. Neuroanatomie de la réévaluation cognitive*

Dans la perspective des neurosciences affectives, les émotions sont décrites comme des états fonctionnels mis en œuvre par des systèmes neuronaux afin de réguler des comportements complexes (Adolphs, 2017; Dubois et al., 2020). Au cours des deux dernières décennies, un nombre croissant d'études se sont intéressées aux corrélats neuronaux de la régulation émotionnelle, principalement avec l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (ou IRMf) (Buhle et al., 2014; Ochsner & Gross, 2005; Ochsner et al., 2012). Le protocole expérimental le plus courant consiste à faire regarder des stimuli visuels issus de l'International Affective Picture System ou IAPS (Lang et al., 1997) de différentes valences et de comparer l'activation neuronale dans la condition « maintenir » ou « réguler » l'émotion. La majorité des études se sont concentrées sur la régulation à la baisse des émotions négatives, négligeant la régulation à la hausse et la régulation des émotions positives. Néanmoins, la compréhension des mécanismes derrière la régulation à la hausse est aussi essentielle. La dérégulation émotionnelle à la hausse est présente dans les troubles psychiatriques sous la forme d'une réactivité excessive aux stimuli émotionnels par exemple (Levy et al., 2006; van der Meer et al., 2009).

Malgré le grand nombre d'articles sur la régulation à la baisse des émotions négatives, la littérature en imagerie fonctionnelle n'est pas parvenue à un consensus quant aux processus neuronaux sous-jacents. Les études conviennent largement de l'implication de régions frontales et pariétales liées au contrôle qui viendraient moduler la réponse émotionnelle au niveau des systèmes générateurs de l'émotion tels que l'amygdale et l'insula (Buhle et al., 2014; Kohn et al., 2014). Toutefois, ces recherches ne concordent pas complètement sur la façon dont cette régulation se fait. L'interaction intense entre ces structures modulerait les réponses aux stimuli émotionnels. Ainsi, une réduction de l'expérience affective négative, par une réévaluation cognitive, a été démontrée à partir de données autodéclarées et physiologiques. Cette réduction de l'expérience émotionnelle négative impliquait des zones cérébrales qui appartenaient au circuit fronto-limbique (Gross, 1998;

Ochsner et al., 2002b; Urry, 2009). Pour ce qui est du déroulement plus en détail, plusieurs méta-analyses et revues proposent des modèles différents à partir des études en neuroimagerie fonctionnelle.

Une première méta-analyse, incluant 13 études sur les bases neuronales de la réévaluation cognitive, par Kalisch (2009) avait abouti à une proposition de modèle. Ce modèle conceptualisait la réévaluation en deux étapes : une phase de mise en œuvre précoce et une phase de maintenance ultérieure, toutes deux soutenues par des réseaux frontaux distincts.

D'après les revues de Ochsner and Gross (2005, 2007) et ultérieurement de Ochsner et al. (2012), il existerait principalement deux visions du déroulement des processus neuronaux soutenant la régulation émotionnelle. D'après la première vision, les régions dorsales du cortex cingulaire antérieur et du cortex préfrontal participent à la sélection et l'implémentation de la réévaluation. Ensuite, via une action du cortex ventromédian préfrontal, une régulation à la hausse ou à la baisse s'effectue sur l'activité de l'amygdale et de l'insula. Une autre vision soutient que les régions préfrontales et pariétales exercent un contrôle sur les systèmes perceptifs, sémantiques et affectifs dans les régions temporales latérales afin de moduler la représentation des stimuli comme plus ou moins menaçants par exemple.

Une méta-analyse de Buhle et al. (2014) a regroupé 48 études en imagerie fonctionnelle (IRMf) sur la réévaluation cognitive afin de départager ces deux visions. Les résultats allaient dans le sens des deux modèles avec une activation des régions de contrôle cognitif qui modulent les systèmes de représentation des stimuli, qui eux-mêmes, modulent la génération de l'émotion, mais au niveau de l'amygdale seulement. Aussi, d'après cette étude, le cortex ventromédian préfrontal ne constituerait pas la voie intermédiaire entre les régions de contrôle et l'amygdale puisque ce rôle reviendrait aux régions temporales latérales de représentation.

Kohn et al. (2014) proposent un modèle de régulation légèrement différent à partir d'une méta-analyse de 23 études en IRMf et tomographie par émission de positron (TEP). Ces études comparaient la régulation émotionnelle à une condition contrôle, peu importe la stratégie, mais au final, utilisaient le plus souvent la réévaluation cognitive. D'après cette méta-analyse, la régulation se déroulerait en 3 étapes. En premier lieu, l'évaluation des émotions qui en ce qui concerne le cortex préfrontal ventrolatéral, suivit de l'initiation de la régulation liée au cortex préfrontal dorsolatéral. Enfin, nous avons l'exécution de la régulation au niveau de l'aire motrice

supplémentaire notamment avec un cortex cingulaire antérieur qui jouerait le médiateur entre ces réseaux.

Les études en IRMf actuelles se concentrent désormais sur le couplage fonctionnel entre ces réseaux neuronaux distribués (Buckner et al., 2013). Une étude de Banks et al. (2007) a ainsi exposé une connectivité interrégionale entre l'amygdale et le cortex préfrontal dans la régulation des émotions. L'activité dans des zones spécifiques du cortex frontal (dorsolatéral, dorsal médian, cingulaire antérieur, orbital) serait en covariation avec l'activité de l'amygdale. Aussi, la force du couplage de l'amygdale avec le cortex orbitofrontal et le cortex préfrontal dorsal médian prédirait la réduction de l'affect négatif. Ces résultats témoignent de l'importance de la connectivité fonctionnelle entre les structures frontales et limbiques dans la régulation émotionnelle.

Par ailleurs, peu d'études se sont intéressées à la régulation à la hausse. Quelques-unes ont comparé les structures neuronales impliquées dans les deux formes de régulation, soit à la baisse et à la hausse (Eippert et al., 2007; Grecucci et al., 2013; Ochsner et al., 2004; Schulze et al., 2011). Les études suggèrent un chevauchement partiel des réseaux cérébraux impliqués dans les processus de régulation à la baisse et à la hausse par réévaluation cognitive. Des régions frontales connues pour être impliquées dans le contrôle cognitif, notamment le gyrus frontal inférieur, le cortex préfrontal latéral et le cortex cingulaire antérieur semblent être mis en jeu. Ainsi, ces structures seraient impliquées dans les deux conditions de régulation avec quelques différences d'activation, indiquant un chevauchement partiel et non total des réseaux neuronaux. L'étude de Ochsner et al. (2004) suggère que seule la régulation à la hausse recrute les régions du cortex préfrontal rostromédial gauche. Cette région serait impliquée dans la récupération de la connaissance des émotions et que seule la régulation à la baisse recruterait les régions du cortex préfrontal latéral et orbital droit, impliquées dans l'inhibition comportementale. Aussi, les activations de l'amygdale et de l'insula semblent être augmentées dans le cas d'une régulation à la hausse et diminuées lors de la régulation à la baisse de l'émotion négative (Eippert et al., 2007; Grecucci et al., 2013; Ochsner et al., 2004).

Par son excellente résolution spatiale, l'imagerie fonctionnelle est un outil très adapté à la description précise des activations de zones cérébrales en action. Néanmoins, elle ne permet pas une mesure directe de l'activité cérébrale et de la chronologie rapide des processus cognitifs sous-jacents de l'ordre de quelques centaines de millisecondes. En dépit de recherches innovantes et

récentes, nous en savons encore peu sur la dynamique temporelle et les mécanismes psychophysiologiques qui sous-tendent la régulation émotionnelle. Évidemment, les techniques invasives ne sont pas possibles chez l'humain sain. Toutefois, l'électroencéphalographie permet de mesurer directement l'activité cérébrale à la surface du scalp et de mettre cette activité en relation avec les processus cognitifs qui se déploient en termes de millisecondes suivant la présentation de stimuli ou de conditions spécifiques.

## **1.2. Les rythmes cérébraux, les cognitions et les émotions**

### ***1.2.2. Histoire et genèse de l'EEG***

C'est ici qu'intervient l'électroencéphalographie (EEG) qui consiste en l'enregistrement direct de l'activité électrique corticale par des électrodes placées sur le cuir chevelu. Le tracé résultant de l'enregistrement est appelé électroencéphalogramme. Cet examen non invasif, indolore et peu relativement coûteux possède une excellente résolution temporelle qui renseigne sur la dynamique temporelle des activités cognitives, surtout au niveau cortical. Cette technique d'enregistrement date de près d'un siècle. En 1928, le prix Nobel de physiologie Edgar Adrian (1889-1977) découvre, par hasard, la présence d'électricité dans les cellules nerveuses. Il y parvient grâce à l'électrométrie capillaire pour amplifier les signaux produits par les décharges électriques de fibres nerveuses isolées, sous l'effet de stimuli physiques (Adrian & Bronk, 1928; Adrian & Matthews, 1928). Subséquemment, Hans Berger (1873–1941) enregistre le premier EEG sur un humain en 1929 en plaçant une électrode sur le cuir chevelu. Dès les premières études de Berger, on constate les variations de fréquence EEG. Cette activité électrique, pour la première fois qualifiée de *Elektrenkephalogramm*, montre des variations de fréquences importantes selon que le participant a les yeux ouverts ou fermés, appelées fréquences Alpha et Beta (Berger, 1929). Il est le premier à noter que cette fréquence alpha varie selon que le participant effectue une tâche cognitive, comme la lecture ou l'écoute d'un stimulus auditif (Lavoie et al., 2016). Dans les décennies suivant cette découverte, l'EEG s'est avéré utile au monde scientifique et clinique avec l'étude du sommeil, de l'effet de l'hypoxie, des maladies psychiatriques et de l'épilepsie. L'évolution de l'outil et de son utilisation est un processus continu jusqu'à aujourd'hui.

L'enregistrement de l'EEG se base sur l'activité électrophysiologique des cellules nerveuses ou neurones. Les cellules du système nerveux central produisent une activité électrique que l'on

peut capter à la surface du scalp. Le message électrique ou potentiel d'action d'un premier neurone est transformé en message chimique au niveau des synapses, lieu de communication entre deux neurones. Le message chimique, sous la forme de neurotransmetteurs passe dans la fente synaptique et est réceptionné par les récepteurs post-synaptiques d'un second neurone puis reconverti en message électrique. L'excitation d'un neurone à travers la synapse entraîne l'ouverture de canaux ioniques au niveau de la membrane, provoquant des mouvements de particules ioniques dans les milieux intra- et extra-cellulaires. L'EEG enregistre les potentiels électriques associés aux courants extra-cellulaires, qui permettent d'équilibrer les charges à la suite des modifications de concentration ionique au niveau de la synapse (Sanei & Chambers, 2013). L'activité EEG de surface constitue en fait la sommation de l'activité d'un groupe de neurones post-synaptiques.

L'étude de la cognition à l'aide de l'EEG concerne principalement l'étude des potentiels évoqués ou Event-related Potentials (ERPs), qui sont des modifications transitoires de l'activité neurophysiologique suite à une stimulation externe ou un processus cognitif. Les ERPs sont des dérivés moyennés de l'activité EEG spontanée et reflètent des processus cognitifs distincts. Contrairement aux potentiels évoqués, les rythmes EEG sont des signaux spontanés, présents en tout temps, mais qui peuvent être aussi modulés lors des processus cognitifs. Néanmoins, peu d'études se sont intéressées à ces rythmes EEG dans la compréhension des processus cognitifs.

### ***1.2.3. Rythmes cérébraux et EEG quantitatif***

Les processus cognitifs, tels que la mémoire, l'attention ou encore les émotions, seraient originaires d'un mécanisme de synchronisation des neurones, appelé aussi oscillations ou rythme cérébral avec une gamme de fréquences et une dynamique temporelle propre (Salinas & Sejnowski, 2001). Cette spécificité se base sur l'hypothèse de régions cérébrales différentes qui rempliraient des fonctions différentes et spécifiques (hypothèse de Brodmann, 1999). Les neurones forment donc des réseaux oscillants ou rythmes cérébraux à différents niveaux de fréquences, classiquement delta (1-3 Hz), thêta (3-8Hz), alpha (8-13 Hz), bêta (13-30 Hz) et gamma (30-100 Hz). Ils ont été découverts par l'utilisation de l'électroencéphalographie et peuvent aussi être étudiés par magnétoencéphalographie, avec des enregistrements électrophysiologiques in vitro (Buhl et al., 1998) et in vivo (Buschman & Miller, 2007). Les fonctions et les processus sous-jacents inhérents aux rythmes cérébraux restent cependant incertains, suscitant un intérêt croissant des chercheurs.

Les ondes delta (1-3 Hz) seraient caractéristiques d'un fonctionnement au ralenti du cerveau. On les retrouve dans des stades de sommeil profond et après des lésions cérébrales (Steriade et al., 1993). Au niveau cognitif, ces ondes participeraient aux processus de motivation et d'attention par l'inhibition des processus connexes. Les anomalies des oscillations delta sont souvent présentes dans les déficits motivationnels et les comportements antisociaux (Knyazev, 2007; Knyazev, 2012). Les structures neuronales génératrices de ces oscillations se situeraient d'ailleurs dans les circuits liés à la motivation et la récompense de base dans les régions du cortex frontal et cingulaire (revue de Knyazev, 2007).

L'activité thêta (3-8 Hz) a été associée aux processus émotionnels (Knyazev et al., 2009) et mnésiques (revue de Buzsáki, 2005) ainsi qu'au contrôle cognitif (Cavanagh & Frank, 2014), à l'inhibition et à l'attention soutenue (Sauseng et al., 2006). On retrouve des perturbations de l'activité thêta dans les populations souffrant de troubles anxieux ou de troubles avec des déficits émotionnels (Korotkova et al., 2018). Ces ondes ont été décrites premièrement par (Saul & David, 1932) comme des courants d'action des structures hippocampiques, mais seraient en fait présentes dans plusieurs régions liées aux émotions, dont le cortex préfrontal et le système limbique (Miller, 2013).

L'activité alpha (8-13 Hz) a été associée aux processus attentionnels dès les premiers travaux de Berger (1929). Beaucoup d'études ont en effet montré que la puissance alpha pouvait être considérée comme une mesure inverse de l'activité cognitive. Plus récemment, cette idée a été remise en question pour proposer que l'activité alpha participe plutôt à l'attention en inhibant les processus non pertinents (Dmochowski et al., 2012; Foxe & Snyder, 2011; Gennady G. Knyazev, 2007). Le rythme alpha est impliqué dans d'autres processus comme la mémoire et les émotions. Au niveau clinique, l'activité alpha spontanée serait plus faible dans la maladie d'Alzheimer et la schizophrénie (revue de Başar & Güntekin, 2012). Les générateurs se situeraient dans les cortex occipito-pariétaux en lien avec la voie visuelle afin de maximiser l'allocation de l'attention (Hari, 1997; Sadato et al., 1998).

L'activité bêta (13-30 Hz) est associée à des processus moteurs dont la fonction motrice et l'imagerie motrice. Ces oscillations soutiendraient la cohérence à grande distance des processus attentionnels, visuels et moteurs (Kilavik et al., 2013).

Enfin, l'activité gamma (30-100 Hz) serait modulée par différents mécanismes tels que l'attention et la mémoire. Ces oscillations permettraient l'émergence de représentations plus complexes à partir d'informations sensorielles de base issues de différentes zones cérébrales, notamment les zones visuelles, mnésiques et attentionnelles (Ray & Maunsell, 2015).

Les états cognitifs et les comportements impliqueraient ainsi, la contribution de différents rythmes (Buzsáki & Draguhn, 2004). Déterminer quel(s) rythme(s) sont en jeu dans une fonction cognitive se fait le plus souvent par l'utilisation d'une technique récente appelée l'EEG quantitatif ou EEGq. Dans les années 1970, l'utilisation des ordinateurs s'étend au traitement des données EEG. Nuwer (1997) introduit les traitements de signaux numériques ou digital signal processing (DSP), afin d'extraire et analyser plus précisément les bandes de fréquence. L'EEGq se distingue de l'EEG avec examen visuel des tracés, par un ensemble d'analyses ou processus mathématiques appliqués à l'électroencéphalogramme, notamment un algorithme de transformation rapide appelé Fast Fourier Transform (FFT). Suite à l'acquisition du signal sur le scalp, les analyses quantitatives permettent le traitement, la transformation et l'analyse de signaux numériques EEG à l'aide d'algorithmes. Les signaux EEG analogiques deviennent numériques avec l'avantage de pouvoir être stockés dans les ordinateurs et quantifiés de manière plus précise au niveau des électrodes individuelles et du scalp entier. Il est désormais possible d'identifier l'amplitude et la puissance relative du signal dans des fréquences spécifiques, ainsi qu'étudier la connectivité fonctionnelle entre les régions en estimant l'alignement des oscillations par rapport à d'autres oscillations. L'analyse temps-fréquence permet d'observer les changements au cours du temps de trois caractéristiques des oscillations : la fréquence, la puissance et la phase.

Aussi les différences d'activité à des fréquences précises entre deux conditions peuvent être inspectées sur des visions topographiques indiquant les différences significatives ou de manière plus précise à l'aide d'analyses statistiques telles que des analyses de variance. Par exemple, les analyses permettent de contraster l'activité lors d'une tâche en comparaison à une condition contrôle ou l'activité d'un cerveau atteint d'un trouble neurologique en comparaison à un cerveau sain. L'EEG quantitatif peut donc servir à des fins cliniques et de recherche via le spectre des fréquences EEG au niveau du scalp. Néanmoins les techniques d'acquisition, de traitement et les méthodes d'analyses statistiques sont diverses et provoquent des débats dans la recherche en neurosciences (Kanda et al., 2009).

Contrairement à l'IRM, l'EEG possède une faible résolution spatiale. Néanmoins, celle-ci a été améliorée en partie depuis les 20 dernières années par l'ajout d'électrodes (64 ou plus typiquement, mais peut aller jusqu'à 256). Cette amélioration a aussi permis l'avènement de techniques de localisation de sources, dont sLORETA ou *standard Low Resolution Brain Electromagnetic Tomography* (Pascual-Marqui et al., 1999; Pascual-Marqui et al., 1994). Les mesures EEG sont extra-crâniennes et ne permettent pas d'avoir des informations sur la distribution de l'activité neuronale sous-corticale, c'est ce que l'on nomme problème inverse. La tomographie électromagnétique cérébrale à basse résolution (LORETA en anglais) tente de parer à ces contraintes électrophysiologiques en modélisant la distribution tridimensionnelle à l'intérieur du cerveau, à partir de l'activité neuronale mesurée sur le scalp (Pascual-Marqui et al., 2002). De nombreuses études de validation indiquent une faible marge d'erreur dans la localisation des sources par cette méthode (Cannon et al., 2012; Thatcher et al., 2005; Wagner et al., 2003).

#### ***1.2.4. Rythmes cérébraux et régulation émotionnelle***

Au cours des deux dernières décennies, deux composantes oscillatoires dominantes, les oscillations thêta de 3 à 8 Hz et les oscillations alpha de 8 à 13 Hz, ont émergé d'expériences portant sur les émotions et la régulation émotionnelle.

Comme vu dans le chapitre précédent, la fréquence thêta est présente dans une diversité de processus cognitifs, mais est particulièrement sensible aux processus émotionnels (Knyazev, 2007). L'activité frontale de thêta a été associée à l'activité limbique dans des recherches en montrant que le rythme thêta préfrontal était verrouillé en phase à l'activité thêta de l'hippocampe (Jensen, 2005; Siapas et al., 2005). En cohérence avec ces résultats, des études suggèrent que les neurones des structures limbiques produisent une activité thêta lors de l'induction émotionnelle (Aftanas et al., 2001; Nishitani, 2003; Paré, 2003). Néanmoins, il est admis que le rythme thêta jouerait un rôle central dans la régulation émotionnelle plus que dans l'induction en raison de son implication dans les mécanismes de contrôle cognitif (Cavanagh & Frank, 2014). Le rythme thêta est considéré comme un marqueur de l'engagement du cortex préfrontal dans le contrôle cognitif dirigé vers un objectif (Cohen, 2014; Cooper et al., 2019). Cela permettrait l'intégration des informations du système limbique et des structures du tronc cérébral, de l'hypothalamus et du néocortex (Kirk & Mackay, 2003).

Aussi, l'activité thêta frontale s'est avérée être modulée par la régulation à la baisse des émotions avec néanmoins pas de consensus dans la littérature sur l'augmentation ou la diminution de l'activité thêta dans ce processus. Dans plusieurs études détaillées ci-contre, tantôt l'augmentation ou la diminution de la puissance thêta frontale a été corrélée avec une régulation émotionnelle réussie. Notamment, un couplage dans les fréquences thêta entre les zones préfrontales liées au contrôle cognitif et les structures limbiques impliquées dans la génération des émotions, dont l'amygdale a été montrée lors d'une expérimentation sur des rats (Lesting et al., 2011). Par la suite, Ertl et al. (2013) ont montré pour la première fois, chez l'humain, une augmentation des oscillations thêta à 4 Hz lors de la réévaluation d'images déplaisantes. Ces effets étaient principalement observés autour de 3 à 5 s après le début de la réévaluation avec comme générateurs probables le gyrus frontal et moyen inférieur gauche. D'après les auteurs, les oscillations thêta frontales joueraient un rôle dans le couplage entre les régions liées au contrôle du cortex préfrontal et l'amygdale, en cohérence avec les résultats de Lesting et al. (2011) sur le modèle animal. Au contraire de ces premiers résultats, une diminution des oscillations thêta frontales et centropariétales a été trouvée en lien avec la régulation émotionnelle d'images déplaisantes par réévaluation cognitive (Wei et al., 2017). L'hypothèse des auteurs était que la diminution des oscillations thêta constatée était liée à une réduction de l'attention envers les stimuli déplaisants dans les étapes ultérieures de la réévaluation et non au contrôle cognitif des premières étapes. Néanmoins, les études sur la régulation émotionnelle impliquant principalement des mécanismes attentionnels (déploiement attentionnel et distraction) ont mis à jour des modulations du thêta occipital et non frontal (Uusberg et al., 2014; Zhang et al., 2013).

En effet, des modulations occipitales de l'activité thêta ont été trouvées dans plusieurs études ci-contre. La réévaluation cognitive et la distraction, stratégie intervenant plus précocement au niveau de l'attention, ont été utilisées dans un même protocole (Uusberg et al., 2014). Des perturbations thêta occipitales précoces en réponse à l'induction émotionnelle ont été constatées lors d'un premier pic autour de 150 à 350 ms, non sensibles à la régulation (que ce soit distraction ou réévaluation). Un second pic était observé autour de 350-550 ms, atténué par la stratégie de distraction seulement. Pour ce qui est de la réévaluation, des modulations du thêta occipital plus tardives, autour de 1 à 4 sec, furent constatées. Selon la stratégie de régulation émotionnelle, les modulations de l'activité thêta dans les régions occipitales étaient retrouvées à différents moments de la régulation. Ces constatations sont cohérentes avec une autre étude dans laquelle une

atténuation de la puissance thêta de manière précoce a été mise à jour lors de la régulation par stratégie de distraction (Zhang et al., 2013). Aussi, Sulpizio et al. (2021) ont trouvé des modulations postérieures du thêta lors de l'utilisation de la stratégie de distanciation. Ces chercheurs se sont intéressés plus précisément à la dynamique de ce processus en séparant l'effet de stratégie, lors de la préparation à réguler avant l'apparition du stimulus, et l'effet de régulation, lors l'apparition du stimulus. L'effet de stratégie était associé à une augmentation précoce des oscillations thêta dans les régions postérieures tandis que l'effet de régulation par distanciation provoquait une diminution des oscillations thêta dans ces mêmes régions.

Contrairement aux stratégies de déploiement attentionnel qui ont été clairement liées à une diminution des oscillations thêta postérieures, les modulations du thêta lors de la réévaluation cognitive ne font donc pas consensus. Pour résumé, la réévaluation à la baisse des émotions a été liée à une augmentation du thêta frontal (Ertl et al., 2013; Lesting et al., 2011), une diminution du thêta frontal et centro-pariétal (Wei et al., 2017) et une diminution du thêta occipital de manière plus tardive (Uusberg et al., 2014). De plus, certaines études ont trouvé des modulations différentes du rythme thêta lors de différentes activités cognitives lorsqu'on le divise en thêta bas (3 à 5,5 Hz) et thêta haut (5,5 à 8 Hz) (Fellinger et al., 2011; Salisbury & Taylor, 2012). Seule l'étude de Ertl et al. (2013) avait séparé le rythme thêta en deux rythmes distincts. Les chercheurs avaient mis à jour une absence de modulation significative dans le thêta haut alors que le thêta bas frontal augmentait lors de la réévaluation à la baisse. Cette distinction entre thêta bas et thêta haut pourrait constituer une piste pour expliquer les incohérences entre les études. Pour ce qui est de la régulation à la hausse des émotions par réévaluation, seule l'étude de Ertl et al. (2013) a constaté une augmentation de l'activité thêta bas frontale puisque les autres études se sont seulement intéressées à la régulation à la baisse (Uusberg et al., 2014; Wei et al., 2017). Ces résultats restent donc à vérifier.

L'autre composante dominante dans l'étude des émotions est le rythme alpha. Connue pour refléter l'inhibition corticale dans le but d'amplifier l'attention (Knyazev, 2007; Dmochowski et al., 2012; Foxe & Snyder, 2011), le rythme alpha serait en conséquence lié à l'attention émotionnelle envers les stimuli pertinents. Néanmoins, les études se contredisent quant à l'augmentation ou la diminution de l'activité alpha et quant aux régions impliquées lors des processus émotionnels. Une augmentation de la puissance alpha dans les régions postérieures a été

constatée très précocement lors de la visualisation d'images déplaisantes, dès 350 ms (De Cesarei & Codispoti, 2011; Uusberg et al., 2013). À contrario, une diminution des oscillations alpha dans les régions antérieures et postérieures fut soulignée dans d'autres études (Aftanas et al., 2004 ; Aftanas et al., 2002) alors que certaines n'ont trouvé aucune modulation significative (Keil et al., 2001 ; Müller et al., 1999).

Pour ce qui est de la régulation émotionnelle, l'activité alpha a principalement été étudiée par la mesure de l'asymétrie alpha frontale. Cette mesure a d'abord été utilisée dans les études qui s'intéressent aux mécanismes d'approche-évitement face à un stimulus. L'approche a été associée à une puissance alpha sur l'hémisphère gauche frontal plus faible que le droit tandis que l'évitement a été associé à l'asymétrie opposée (Coan & Allen, 2004; Harmon-Jones et al., 2010; Miller et al., 2013). Plusieurs études ont montré que la régulation des émotions à la baisse est liée à une plus grande activité frontale gauche relative (Chen et al., 2019; Goodman et al., 2013; Jackson et al., 2003; Li et al., 2021; Papousek et al., 2017; Wang et al., 2015). Pourtant, cette augmentation serait présente pour certaines stratégies seulement, comme montrée dans un paradigme avec les stratégies de réévaluation à la baisse et de suppression (Choi et al., 2016). L'activité alpha frontale gauche augmentait lors de la réévaluation, mais aucune modulation de l'activité alpha n'était constatée pour la suppression, ce qui va dans le sens d'une moindre efficacité de la stratégie de suppression (Jackson et al., 2000). Aussi, Parvaz et al. (2012) ont trouvé une diminution de la puissance alpha frontale indiquant une augmentation de l'activité alpha frontale gauche lors de la réévaluation à la baisse d'images négatives et neutres. Néanmoins, les résultats ne sont pas unanimes puisque Tolegenova et al. (2014) ont trouvé des modulations de la puissance frontale thêta et gamma, mais pas alpha lors de l'utilisation de la réévaluation à la baisse et de la suppression face à des films induisant la peur. Par ailleurs, à notre connaissance, aucune étude n'a montré de modulation de la puissance alpha lors de la régulation à la hausse des émotions.

### **1.3. Objectifs et hypothèses**

Les modulations dans les bandes de fréquences observées lors de la régulation émotionnelle semblent dépendre de la stratégie de régulation utilisée. La réévaluation cognitive est une stratégie d'intérêt pour les études expérimentales puisqu'elle peut être pratiquée de manière consciente, et permet de réguler à la hausse ou à la baisse les émotions négatives et leurs effets physiologiques (Hajcak et al., 2010; Jackson et al., 2000; Moser et al., 2010; Ochsner et al., 2004; Ray et al., 2010).

À partir des résultats cohérents de la recension, on peut supposer que l'activité thêta est principalement modulée pendant la phase de réévaluation cognitive en lien avec le rôle connu du thêta dans le contrôle cognitif (Cavanagh & Frank, 2014; Cohen, 2014; Cooper et al., 2019). L'activité alpha, quant à elle, serait principalement modulée par l'orientation de l'attention pendant la phase d'induction émotionnelle (Knyazev, 2007; Dmochowski et al., 2012; Foxe & Snyder, 2011). Bien qu'une augmentation de l'activité thêta lors de la régulation à la hausse a été observée précédemment (Ertl et al., 2013), la bande de fréquence alpha n'a pas été étudiée spécifiquement dans ce contexte à notre connaissance.

L'étude de l'implication des oscillations dans les bandes alpha et thêta selon les régions et au cours du temps pourrait nous renseigner sur les mécanismes neuronaux mis en jeu dans la réévaluation cognitive. De plus, nous proposons que le rythme thêta peut être fractionné en sous-composantes afin d'affiner sa sensibilité à des processus cognitifs spécifiques. Dans cette optique, nous proposons de découper en bande de fréquence thêta bas (3 à 5,5 Hz) et thêta haut (5,5 à 8 Hz) en nous basant sur les différentes modulations trouvées dans des études précédentes (Ertl et al., 2013; Fellingner et al., 2011; Salisbury & Taylor, 2012). Selon la recension actuelle, aucune étude n'a investigué les bandes de fréquences alpha et thêta pendant la réévaluation cognitive d'images déplaisantes dans un même protocole.

Nous proposons donc d'examiner les activités alpha et thêta en réponse à une tâche de réévaluation cognitive des émotions et d'estimer les générateurs de ces oscillations par une modélisation des sources. Puisque seule l'étude de Ertl et al. (2013) a étudié le rythme thêta bas et thêta haut dans la régulation émotionnelle à la baisse et à la hausse, nous avons répliqué leur protocole afin de vérifier si nous trouvons les mêmes résultats. Sur la base de leurs résultats, nous avons émis l'hypothèse que la réévaluation cognitive des images déplaisantes est liée à une augmentation des oscillations thêta basses (3-5,5 Hz) prédominantes dans les électrodes frontales pendant la phase de régulation émotionnelle à la baisse et à la hausse et est positivement liée au succès de la régulation des émotions. En ligne avec ces résultats, nous nous attendions à ce que la localisation de la source révèle des générateurs d'oscillations thêta dans le gyrus frontal inférieur moyen et gauche à l'origine des différences entre les conditions de régulation. En parallèle, nous proposons également d'extraire la bande de fréquence alpha afin de vérifier si ce rythme est

impliqué dans l'induction émotionnelle, mais pas dans la régulation des émotions, étant donné son rôle connu dans l'attention émotionnelle.

## Chapitre II. Article en soumission dans la revue *Emotion*

### Alpha and Theta oscillations during the cognitive reappraisal of aversive pictures: a Spatio-temporal qEEG analysis

Inès Zouaoui, Meryem Zellag, Julien Hernout, Alexandre Dumais, Stéphane Potvin, and Marc E. Lavoie

Laboratoire de Psychophysiologie Cognitive et Sociale, Centre de Recherche de l'Institut  
Universitaire en Santé Mentale de Montréal

Département de Psychiatrie et Addictologie, Université de Montréal

#### Author Note

Inès Zouaoui: <https://orcid.org/0000-0002-6190-7154>

Alexandre Dumais : <https://orcid.org/0000-0002-4480-0064> ; <https://publons.com/wos-op/researcher/AAQ-3395-2020/>

Stéphane Potvin : <https://orcid.org/0000-0003-1624-378X> ; <https://publons.com/wos-op/researcher/AAF-3055-2021/>

Marc E. Lavoie : <https://orcid.org/0000-0002-3037-3890> ; <https://publons.com/wos-op/researcher/M-4771-2019/>

We have no conflict of interest to disclose. We report how we determined our sample size, all data exclusions, all manipulations, and all measures in the study. This study's design and its analysis were not pre-registered. Materials and analysis code for this study are available upon request. The data have not been used in prior published or in press manuscripts.

Correspondence concerning this article should be addressed to Marc E. Lavoie, Laboratoire de Psychophysiologie Cognitive et Sociale, Centre de Recherche de l'Institut Universitaire en Santé Mentale de Montréal.

Email: [marc.lavoie@umontreal.ca](mailto:marc.lavoie@umontreal.ca)

## Abstract

**Context:** Emotion regulation is a set of processes responsible for controlling, evaluating and adjusting reactions to achieve a goal. Results derived from magnetic resonance imaging agreed on the involvement of frontal and limbic structures in this process. Findings using cognition and physiology interactions are still scarce but suggest a role for alpha rhythm in emotional induction and theta in regulation. **Objectives and hypotheses:** Our goal was to investigate theta and alpha rhythm during the reappraisal of aversive stimuli. We hypothesized that an implication of alpha rhythm in emotional induction only and an increase in prefrontal theta rhythm positively correlated with successful regulation. **Method:** Twenty-four healthy participants were recorded with 64 EEG electrodes while asked to passively watch or reappraise negative pictures. Theta and alpha rhythms were compared across maintain, decrease and increase regulation conditions, and a source localization estimated the generators. **Results:** Theta activity was consistently higher in the upregulation than in the maintenance condition ( $p=.04$ ) for the entire control period, but mainly at the beginning of regulation (1-3 sec) for low-theta and later (5-7 sec) for high-theta. Moreover, our results confirm that a low-theta generator correlated with mainly the middle frontal gyrus and the dorsal anterior cingulate cortex during upregulation. Theta was sensitive to emotion upregulation, whereas the alpha oscillation was non-sensitive to emotion induction and regulation. **Conclusion:** The low-theta rhythm was involved explicitly in emotion upregulation processes that occur at a definite time during reappraisal, whereas the alpha rhythm was not altered by emotion induction and regulation.

*Keywords:* emotion regulation, cognitive reappraisal, EEG theta, EEG alpha, sLORETA

## Introduction

One of the most critical roles of affective phenomena is their regulatory function in mobilizing individuals' resources to cope with the unexpected, avoid punishment, and secure nourishment and pleasure. Emotions are fundamental to social interaction and personality development and constitute a protective factor against psychopathology (Davidson et al., 2009). Emotion regulation constitutes an array of cognitive processes responsible for controlling, evaluating and adapting the intensity and duration of emotional reactions (Ochsner & Gross, 2005). It allows flexible emotional responses and thus facilitates social interactions, cognitive tasks, or the pursuit of short and long-term goals. These responses involve that after a situation requesting attention, emotional processes can still be adjusted by cognitive reappraisal. Cognitive reappraisal is the attempt to reinterpret a situation in a way that alters its meaning and emotional impact. Compared to other strategies, it is associated with improved cognitive, social and emotional consequences in the short term, better emotional patterns and improved social functioning and well-being (Braunstein et al., 2017). The goal of decreasing (downregulation) or increasing (upregulation) an emotion can be voluntary and conscious, but it often happens implicitly and outside awareness (Koole et al., 2015). It is possible to elicit this cognitive assessment by asking to increase the subjective experience by focusing on the negative aspects of catastrophic thinking, increasing the impact of a situation, or decreasing the subjective experience by focusing on the positive aspects. It is also conceivable to create a more neutral condition and maintain a state where the participant will be asked, for example, to continue to look at an image steadily without trying to change the course of the emotion (Thompson, 1994).

Emotion regulation can be broken down into several complex steps. Gross (1998, 2015) proposed an emotion generation and regulation model broadly used in affective neuroscience. This model proposes four stages of emotional induction: the occurrence of a relevant situation, the focus of attention, appraisal, and emotional responses. Two types of emotion regulation strategies occur at different times with this model. Gross defined strategies focused on the antecedent with situation selection, situation modification, attentional deployment, distraction and cognitive reappraisal, and the response with expressive suppression. These strategies are not equally effective. Research suggests that downregulation via cognitive reappraisal decreases negative emotional experiences while expressive suppression maintains or even increases them and is linked to adverse cognitive,

social, and affective consequences (Bebko et al., 2011; Gross & Thompson, 2007; Nezlek & Kuppens, 2008).

Advances in neuroimaging have made it possible to investigate the cerebral regions involved in emotion regulation. Within the affective neuroscience perspective, emotions are functional states implemented in the activity of neural systems that regulate complex behaviors (Adolphs, 2017; Dubois et al., 2017). However, despite recent advances, the various fMRI studies are not entirely consistent on the cerebral regions related to emotion regulation and how it affects brain activity. Meta-analyses have nevertheless shown agreement in the literature on the involvement of two systems in generating emotion and its regulation (Berboth & Morawetz, 2021; Frank et al., 2014). The ventral system, composed of the amygdala, the insula and the anterior cingulate cortex, would be involved in detecting emotions, while the dorsal system, composed of the dorsolateral and ventrolateral prefrontal cortex, would be involved in cognitive control. Cognitive control in dorsal regions would modulate activity in ventral regions related to emotional response. Thus, a reduction in negative affective experience by cognitive reassessment has been shown from self-reported and physiological data involving brain areas belonging to the frontal- limbic circuit (Gross, 1998; Ochsner et al., 2002a; Urry, 2009).

However, the temporal dynamics and psychophysiological mechanisms underlying these regulation processes are less known. Likewise, we still do not fully grasp which intermediate cerebral connectivity mechanisms are at play, especially regarding upregulation. The synchronization of neuronal oscillations in specific frequency bands would play an essential role in interacting with different brain regions. Experimental EEG studies on animals (Lesting et al., 2011) and then on humans (Ertl et al., 2013) revealed that oscillations in the theta band (3 to 8 Hz) are associated with the interaction between the amygdala and the prefrontal cortex during emotion regulation processes. More specifically, Ertl et al. (2013) demonstrated an increase in frontal (Fz) theta oscillations during upregulation and downregulation via cognitive reappraisal of aversive pictures between 3 and 5 s after the onset of regulation.

In contrast to these initial findings, a decrease in frontal and centroparietal theta oscillations was related to downregulation via cognitive reappraisal (Wei et al., 2017). Moreover, studies using other strategies, such as distancing, a form of reappraisal and attentional deployment by distancing the emotional event, and attentional distraction, showed that downregulation of emotions

modulates the theta power early in time, at about 500 ms after the onset of regulation, in the occipital regions related to attention to emotional stimuli (Sulpizio et al., 2021; Uusberg et al., 2014). The result discrepancies between these early occipital modulations and the later frontal modulations could be explained by a difference in strategy. Cognitive reappraisal is a complex strategy requiring greater cognitive control than distancing or distraction strategies. The latter would involve a more straightforward attention shift and deployment (Sulpizio et al., 2021).

Nevertheless, the precise involvement of theta remains to be verified in downward cognitive reappraisal considering the disparities between an increase or decrease in frontal theta (Ertl et al., 2013; Wei et al., 2017). In addition, some studies have found different modulations of the theta rhythm during different cognitive activities when divided into low theta (3 to 5.5 Hz) and high theta (5.5 to 8 Hz) (Fellinger et al., 2011; Salisbury & Taylor, 2012). However, only the study by Ertl et al. (2013) separated the theta rhythm into two distinct rhythms and uncovered a lack of significant modulation in high theta, while low frontal theta increased on downward reappraisal. This distinction between low and high theta could be a clue to explain the inconsistencies between studies. As for emotion upregulation through reappraisal, only the study by Ertl et al. (2013) addressed it and found an increase in frontal theta activity.

Another approach to further look at cognitive reappraisal would be to enlarge the quantitative (q)EEG spectrum. The alpha band (8 to 13 Hz) has also been a subject of interest in downward emotion regulation studies (Choi et al., 2016; Li et al., 2021; Papousek et al., 2017; Parvaz et al., 2012; Popov et al., 2012). For instance, a study by Parvaz et al. (2012) showed a decrease in left frontal alpha power during downward emotion reappraisal, which was related to increased cognitive control by the left prefrontal cortex, while Tolegenova et al. (2014) reported no modulation of alpha activity when using reappraisal. However, most studies suggest that alpha power is reduced in the occipital regions by viewing emotional pictures due to increased attention to relevant stimuli, with minor sensitivity to emotion regulation (De Cesarei & Codispoti, 2011; Dmochowski et al., 2012). To our knowledge, no study has investigated the alpha rhythm in the upregulation of emotions.

Given these results, it is logical to propose that the alpha oscillations would be modulated mainly by orienting attention toward emotional stimuli during the emotional induction phase, while theta activity would be modulated during the cognitive reappraisal phase. Studying the variation of

oscillations in the alpha and theta bands according to brain regions and over time could provide information on the neural mechanisms involved in regulating emotions. However, in the current literature, the alpha and theta frequency bands were not investigated in a unique protocol during the cognitive reappraisal of aversive pictures. Also, previous studies have focused on the downregulation of emotions, leaving aside the upregulation that is also involved in psychiatric disorders (Levy et al., 2006; van der Meer et al., 2009).

Therefore, we propose examining alpha and theta activities during emotional induction and up- and downregulation via cognitive reappraisal of aversive stimuli. We also propose to apply source modelling allowing a generator estimation of these oscillations. Since only the study by Ertl et al. (2013) investigated the low and high theta rhythm in emotional down- and up-regulation, we replicated their protocol to see if we found the same results. Based on these findings, we hypothesize that the cognitive reappraisal of aversive pictures is related to an increase in frontal theta oscillations during the emotion regulation phase and positively correlates to the success of emotion regulation. Therefore, we expected that source localization reveals generators of theta oscillations in the left middle and inferior frontal gyri at the origin of the differences between the regulation conditions. In parallel, we also propose to extract the alpha frequency band to investigate its implication in emotional induction and regulation. We predicted that alpha rhythm is involved in emotion induction but not emotion regulation, given its known involvement in selective and emotional attention.

## **Method**

### **Participants**

Data were collected on 24 participants between 2017 and 2019 during a 2-hour session at the Cognitive and Social Psychophysiology Laboratory of the Centre de recherche de l'Institut Universitaire en Santé Mentale de Montréal. Exclusion criteria were an age outside of 18-45 years old, a history of an individual or familial mental or neurological disorders, concussion, substance use disorder, alcoholism, uncorrected abnormal vision, and failure to follow the procedures. Subjects were recruited through advertisements in local newspapers and from hospital staff. The sample included 14 women and ten men aged 19 to 43, with an average of 29 years old. The sample size was determined by previous studies with similar methodological and repeated measures designs (Ertl et al., 2013). Given our sample size, an additional analysis by biological sex was not

performed. All information regarding the tasks was given, and consent, approved by the local ethics committee (project no 2018-1434, CIUSSS\_EMTL\_391), was collected before starting the procedure. Each participant took part in one recording session and received financial compensation of 40\$ at the end of the experiment.

## **Procedure**

The first part of the session consisted of collecting socio-demographic information and administering self-report questionnaires to assess the variables that could influence emotion regulation. The mood was assessed by the Patient Health Questionnaire Mood Scale (PHQ-9) (9 items rated from 0 to 3, score from 0 to 27 used to classify each participant into the following groups: no depression, mild, moderate, moderately severe or severe depression) (Kroenke et al., 2001), anxiety was assessed by the abbreviated version of the State-Trait Anxiety Inventory (STAI) (6 items rated from 1 to 4, standardized score from 20 to 80) (Marteau & Bekker, 1992), and sleep habits were assessed using the Godbout questionnaire (sleep efficiency = sleep time/time spent in bed, expressed in %) (Limoges et al., 2005). In addition, participants completed the Cognitive Emotion Regulation Questionnaire or CERQ (Jermann et al., 2006) in the French version (36 items from 1 to 5). This questionnaire was specifically designed to assess the use of various cognitive regulation strategies. It can be broken down as an adaptive (20 items measuring the use of acceptance, positive refocusing, refocusing on planning, positive reappraisal and putting into perspective) and a non-adaptive regulation score (16 items measuring the use of self-blame, rumination, catastrophizing and other blame). The CERQ results ensure that participants present normative scores regarding their use of adaptive and non-adaptive regulation strategies in everyday life, outside the experimental setting of our study.

The second part was the emotion regulation task (about 50 min), inspired by Ertl et al. (2013). The stimuli were presented using the OpenSesame 3.1.6 software (Mathôt et al., 2012), and the EEG signal was recorded by the IWave 7.9 software (InstEP System, Montreal, QC, Canada). Ninety aversive pictures (e.g. threatening situations, accidents, and mutilations) and 30 neutral pictures (everyday scenes and objects) were taken from the IAPS or International Affective Picture

System (Lang & Bradley, 2007) in JPEG format (1024\*768)<sup>1</sup>. In addition, three negative and two additional neutral pictures were used for the training. Three verbal instructions, 'Maintain,' 'Decrease,' and 'Increase,' were pre-recorded using Audacity 2.1.2 software (Boston, MA, USA) in stereo WAV format (16 bits, 48 kHz at 1536 kbps). Within a cognitive reappraisal strategy, the three regulation conditions have been used for maintaining, decreasing, and increasing the intensity of the emotion during the presentation of an unpleasant/negative picture. Only the 'Maintain' instruction was used for neutral pictures.

Two computers were used; one was dedicated to presenting stimuli and collecting behavioral responses, while the other recorded the continuous EEG data and stimulus-response triggers. Behavioral responses were collected via a keyboard located in front of the participant. Verbal instructions were broadcasted through stereo speakers located near the participant. First, the emotion regulation instructions were exposed to participants along with cognitive reappraisal aids. For instance, the instruction 'Decrease' invited subjects to generate a less negative interpretation of the scene by imagining that people are actors or focusing on the picture's positive aspects. 'Increase' invited to generate a more pessimistic interpretation of the scene with a catastrophic thought or by imagining that the people involved are relatives. The 'Maintain' condition asked to keep the intensity of the perceived emotion in the picture. All participants were asked to stay in the scene's context and not divert their attention by thinking of unrelated situations. Participants had to avoid looking away from the monitor and moving during the entire EEG recording. They then performed five practice trials and two blocks of 60 trials, each separated by a 5-minute break, while their brain activity was recorded continuously. For each block, the 90 negative and 30 neutral images were randomly divided into two subsets of 45 negative and 15 neutral images. During a trial, the subjects looked at a black screen for 3 sec, and then a neutral or negative picture appeared for 3 sec (induction phase). In addition to having the image displayed on the screen, they heard one of the three verbal instructions, '*Maintain*,' '*Decrease*,' or '*Increase*,' which started the regulation

---

<sup>1</sup> The negative IAPS pictures were 2095, 2205, 2352.2, 2375.1, 2703, 2811, 3000, 3001, 3005.1, 3015, 3016, 3017, 3030, 3053, 3059, 3060, 3062, 3063, 3064, 3068, 3069, 3071, 3080, 3100, 3101, 3102, 3103, 3110, 3120, 3130, 3131, 3140, 3150, 3168, 3170, 3180, 3181, 3191, 3195, 3220, 3225, 3230, 3261, 3266, 3301, 3350, 3400, 3500, 3530, 3550, 6021, 6022, 6212, 6350, 6360, 6415, 6520, 6540, 6560, 6563, 6570, 9040, 9075, 9140, 9163, 9183, 9185, 9187, 9220, 9252, 9253, 9254, 9322, 9325, 9326, 9332, 9405, 9410, 9412, 9413, 9414, 9421, 9433, 9560, 9570, 9571, 9635.1, 9800, 9810, 9910, 9921, 9940 and the neutral IAPS pictures were 1302, 2190, 2191, 2302, 2382, 2383, 2384, 2393, 2512, 2570, 2580, 2702, 2745.1, 2840, 5471, 5635, 5720, 5731, 5875, 7001, 7025, 7036, 7041, 7060, 7110, 7150, 7161, 7175, 7235, 7490, 7705, 7950, 8312.

phase. They had to keep regulating their emotion until the ‘*Relax*’ signal replaced the image on the screen. After this signal, subjects rated the intensity of aversion felt during the emotion induction phase and at the end of the regulation using two Likert scales from 0 = *the picture was not unpleasant* to 5 = *the picture was highly unpleasant*. Both pre/post-regulation ratings were performed at the end of each trial to avoid recording electroencephalographic or electromyographic artifacts. The subtraction of the two scores measured the success of emotion regulation (See ‘Calculation of regulation success’ under this ‘Procedure’ section).<sup>2</sup>

The third step was assessing the emotional nature of the pictures used during the task to ensure the relevance of the picture’s choices. They were randomly presented on the computer monitor and assessed using the Self-Assessment Manikin Test (SAM-Test) (Bradley & Lang, 1994). This test is composed of a valence scale ranging from negative (1) to positive (9) and an arousal scale ranging from a calm state (1) to an excited state (9). This scale was presented after the regulation task to avoid exposing the participant to the stimuli before the EEG recording.

### **Calculation of regulation success**

Based on the pre/post-regulation ratings of pictures specified in the procedure at the end of each trial, we calculated the success of regulation as the frequency of successful emotion regulation according to the instruction for each participant. When subtracting the second rating from the first, a negative difference indicated a successful regulation in the ‘increase aversion intensity’ condition (e.g. Regulation success = occurrence of after minus before aversion score > 0) / number of increase trials), a positive difference score indicated a successful regulation in ‘decrease aversion intensity’ condition (e.g. Regulation success = occurrence of after minus before aversion score < 0) / number of decrease trials). Moreover, a non-difference indicated a successful regulation in the ‘maintain’ condition (e.g. Regulation success = occurrence of after minus before aversion score = 0) / number of maintain trials).

### **EEG recording and pre-processing**

The EEG recording was synchronized to the emotion regulation task, i.e., during the training session and the two blocks of trials. EEG recording was made using 60 Ag/AgCl electrodes fixed in a lycra cap (Sands Research Inc) referenced to nasion and positioned according to the 10-

---

<sup>2</sup> Example of a trial available in Appendix F

10 system (Chatrian et al., 1985). All signals were recorded through the IWave software (I.B. software, Montreal, QC, Canada) with a Sensorium DBPA-1 digital bioelectric amplifier (Sensorium Inc., Charlotte, VT, USA). The EEG was sampled continuously at 500 Hz and recorded with an analog high-pass filter of 0.01 Hz and a low-pass filter of 100 Hz. Impedance was kept below  $5K\Omega$  with an electrolyte gel (JnetDirect Biosciences, Herndon, VA). For subsequent artifact corrections, electrodes were placed at the outer canthus of each eye for horizontal ocular movement, whereas other electrodes were placed below and above the left eye to record vertical ocular movement. Raw EEG signals were corrected offline for ocular artifacts with the Gratton algorithm, a regression-based method using the duration and amplitude of eyeblinks to correct eyeblink artifacts (Gratton et al., 1983).

After artifact corrections, all analyzes were done on Brain Vision Analyzer 2.1.1 (Brain Products GmbH). A 0.1 Hz high-pass and 50 Hz low-pass filters were applied, and a 60 Hz notch filter was used to subtract surrounding electrical noise. After correction for electrooculogram artifacts, EEG amplitudes greater than 100  $\mu$ V were automatically rejected. The remaining artifact, not due to eye movements, were removed manually from the trials. The 17.5-second trials (without the black screen and the ‘Relax’ signal) were segmented for each condition into 4 phases: (baseline, fixation, induction, and regulation). Then, the ‘regulation’ segment was sub-segmented into three equally long phases to observe the temporal course of the regulation more precisely: (1 to 3 sec; 3 to 5 sec; 5 to 7 sec after the instruction). The second, following the instruction, was removed from the EEG analysis.

## **Data processing**

### ***FFT-analysis***

An FFT (Fast Fourier Transform) analysis was applied to process the signal from the time domain to the frequency domain to examine the power for each sub-segment. We calculated an average of the low theta, high theta, and alpha power for every subject and every condition (increase, decrease, maintain for aversive pictures and maintain for neutral pictures), temporal segment, and sub-segment. A baseline correction (the segment of 4s before the picture onset) was applied for each subsegment. Data were exported to SPSS.

### ***Voltage maps***

The quantitative EEG allowed to map of the raw scalp distribution of brain activity in the theta and alpha frequency bands to compare participants in the induction phase across negative and neutral pictures conditions and, in the regulation phase, across decrease/maintain and increase/maintain within different time windows at each electrode. Using BrainVision Analyzer software, we visually inspected the voltage maps representing the differences between the conditions (negative – neutral) in the induction phase, between (decrease – maintain) and between (increase – maintain) in the three temporal segments of emotion regulation 1 to 3s, 3 to 5s and 5 to 7s. We calculated separate voltage distribution maps for low (3.5–5 Hz), high theta (5.5–8 Hz) and alpha (8-13 Hz) for the ‘increase,’ ‘decrease,’ and ‘maintain’ conditions to increase the precision of the frequency window of interest in emotion regulation and because previous studies showed differences between low and high theta in different cognitive processes. Additional analysis of the average over all electrodes of low theta, high theta, and alpha power between baseline, induction, and regulation for negative pictures can be found in Appendix G.

### ***Standardized Low-Resolution Electromagnetic Tomography (sLORETA)***

We estimated the possible generators of theta and alpha oscillations with the standardized algorithm of sLORETA (<http://www.uzh.ch/keyinst/loreta.htm>) to calculate the three-dimensional cortical distribution of current density. Calculations were performed in a realistic head model (Fuchs et al., 2002) using the MNI152 model (Mazziotta et al., 2001), with a three-dimensional solution space limited to cortical gray matter, as determined by Talairach’s probabilistic atlas (Lancaster et al., 2000). Standard MNI152 scalp electrode positions were taken from Oostenveld and Praamstra (2001) and Jurcak et al. (2007). The intracerebral volume was divided into 6239 voxels at a spatial resolution of 5 mm. Thus, sLORETA images represent the electrical activity at each voxel in the neuroanatomical space of the Montreal Neurological Institute (MNI) as the exact magnitude of the estimated current density. In addition, anatomical labels such as Brodmann’s areas (B.A.) have also been reported using the MNI, with a correction to Talairach’s space so that future studies that wish to replicate can make the conversion between spaces. (Brett et al., 2001).

## **Statistical analysis**

### **Behavioral data**

## **Valence and arousal ratings of selected pictures**

Self-Assessment Manikin Test responses (valence and arousal ratings) were compared to IAPS norms and self-questionnaire responses to normative scores to ensure participants were not different from the norms (Lang & Bradley, 2007).

## **The intensity of aversion pre-/post-regulation**

In addition, mean aversive intensity ratings given by participants for neutral pictures with only ‘maintain’ as instruction and negative pictures with ‘maintain,’ ‘increase,’ and ‘decrease’ conditions before and after regulation were compared. Furthermore, we used a 4 x 2 repeated-measures ANOVA with aversive ratings as dependant variable and within-subjects factors in the four conditions (Neutral pictures with ‘Maintain’/Negative pictures with ‘Maintain’/ Negative pictures with ‘Increase’/ Negative pictures with ‘Decrease’) and two times (Before/After regulation) to ensure participants regulated correctly according to the instructions. Finally, we used a posthoc t-test for multiple-comparison.

## **Whole scalp regions FFT analysis**

The low theta, high theta and alpha power were analyzed separately. We compared rhythm activities between negative and neutral pictures to analyze the induction phase. We used a repeated-measures ANOVA, with the within-subjects factors two conditions (negative/neutral pictures), 7 Regions (Anterior-frontal /frontal /fronto-central /central /parietal /parietal-occipital /occipital), 2 Hemispheres (left/right). For the regulation phase, we compared rhythms activities between ‘increase,’ ‘decrease,’ and ‘maintain’ conditions only for negative pictures (since neutral pictures had only the ‘maintain’ condition). We used a repeated-measures ANOVA, with the within-subjects factors three conditions (maintain/decrease/increase) x 7 Regions (Anterior-frontal /frontal /fronto-central /central /parietal /parietal-occipital /occipital) x 2 Hemispheres (left/right). A statistical threshold was fixed at  $p < 0.05$  for all waves. All statistical analyses were performed using IBM SPSS Statistics software version 25 (IBM Corp., New York, USA).

## **Source localization**

To calculate differences in the low and high theta activities between the two experimental conditions (e.g., “maintain” > “increase” or “maintain” > “decrease”), statistical non-parametric mapping (SnPM), as introduced by Nichols and Holmes (2002) was used to compute the averaged

intracerebral current density distribution at time intervals showing significant differences based on non-parametric voxel-by-voxel two-tail paired-samples t-statistic of averages (with 5000 permutations) with a variance smoothing parameter of 1 on the three-dimensional sLORETA images. Statistical significance was assessed by defining critical thresholds (critical t) corrected for multiple comparisons ( $p < 0.01$  and  $p < 0.05$ , respectively) for all tested voxels based on subject-wise normalization and after variance smoothing. In the case of voxel-by-voxel statistics for functional localization, global subject-wise normalization was performed prior to comparisons between conditions to eliminate a source of non-relevant (i.e. non-physiological) variability typical of EEG spectral power (Frackowiak, 2004). The null hypotheses equalled the assumption that experimental conditions had no differences. Current density values at each voxel were computed as a linear and weighted sum of the scalp electric potentials in the solution space. Activation of a given voxel was based on the smoothness assumption, meaning that neighbouring voxels show a highly synchronous activity (Silva et al., 1991). Support comes from electrophysiological studies showing that neighbouring neural populations have highly correlated electrical activity (Haalman & Vaadia, 1997; Silva et al., 1991). As Friston et al. (1994) proposed, activated voxels exceeding critical t values were considered regions of cortical activation. Finally, the statistical analysis resulted in an averaged corresponding three-dimensional intracerebral current density distribution and obtained cortical regions were classified about their corresponding B.A. (Holmes et al., 1998) and normalized coordinates (Talairach and MNI, respectively). We focused the sLORETA analyses on data showing condition effects from the ANOVA applied on the whole scalp power of each oscillation (i.e. theta and alpha). In addition, we used the scores of successful regulations during the task for each participant <sup>3</sup> to investigate whether there was a relationship between successful emotion regulation during the task and the significant differences in low and high theta activity in the regions between the (increase - maintain) and (decrease - maintain) conditions revealed by sLORETA. We used a regression analysis with the success of regulation as an independent variable and sLORETA map values with square roots transformation as a dependent variable.

This study's design and its analysis were not pre-registered. Materials and analysis code for this study are available upon request.

---

<sup>3</sup> See 'Calculation of the regulation success' in Method

## Results

Participants reported average scores within the norms found on large samples of healthy people for sleep duration (Limoges et al., 2005), anxiety (Marteau & Bekker, 1992), and depression scores (Kroenke et al., 2001). Twenty participants reported none to minimal depression scores (ranging from 0 à 4), and 4 participants reported mild-depression scores (ranging from 5 à 9). All participants' CERQ scores were also within the norm (Jermann et al., 2006)(see Table 1).

**Table 1.** Characteristics of the participants

	n	Mean	SD
Age (years)	24	29	9.1
Sex (Male: female)	24	5:7	
Average sleep duration	24	7.7	1.0
Anxiety score (STAI-6)	24	29	8.5
Depression score (PHQ-9)	24	3	2.5
CERQ Adaptative regulation	18*	73	14.7
CERQ Non-adaptative regulation	18*	36	8.7

STAI-6= State-Trait Anxiety Inventory; PHQ-9= Patient Health Questionnaire Mood Scale; CERQ= Cognitive Emotion Regulation Questionnaire or CERQ; SD= standard deviation

\* Only 18 participants completed the Daily Emotion Regulation (CERQ) assessment questionnaire due to its subsequent addition after the first 6-subject administration in 2017.

### **Valence and arousal ratings of selected pictures**

The valences ratings of neutral ( $M = 5.82$ ,  $SD = 1.11$ ) and negative ( $M = 2.17$ ,  $SD = 0.72$ ) pictures differed significantly ( $t = 12.95$ ;  $p < 0.001$ ). Similarly, the arousal ratings for neutral ( $M = 2.82$ ,  $SD = 1.53$ ) and negative ( $M = 6.10$ ,  $SD = 1.31$ ) pictures were significantly different ( $t = -7.45$ ;  $p < 0.001$ ), as expected. Also, the picture's evaluations were rated similarly to the normative ratings of the IAPS, i.e., the valence for neutral ( $M = 5.22$ ,  $SD = 1.29$ ) and negative pictures ( $M = 1.91$ ,  $SD = 1.31$ ) and the arousal for neutral ( $M = 3.13$ ,  $SD = 1.94$ ) and negative pictures ( $M = 6.21$ ,  $SD = 2.28$ ) (Lang et al., 1997).

### **The intensity of aversion pre-/post-regulation**

The repeated-measures ANOVA revealed a main effect of condition ( $F(3.21) = 32.98$ ;  $p < .001$ ;  $\eta^2=.83$   $power=1$ ) and a condition by time ( $F(3.21) = 23.48$ ;  $p < .001$ ;  $\eta^2=.77$   $power=1$ ) interaction. The main effect of the condition was explained by a significantly higher intensity of aversion toward negative pictures within the regulation conditions (Negative pictures with 'Maintain'/ Negative pictures with 'Increase'/ Negative pictures with 'Decrease') compared to neutral pictures (Neutral pictures with 'Maintain'). The subsidiary dependent t-tests, contrasting pre- and post-regulation scores, revealed that the intensity of aversion toward negative pictures in the 'increase' condition is higher after than before regulation and the opposite for negative pictures in the 'decrease' condition. The ratings for neutral and negative pictures in 'maintain' did not differ significantly before and after regulation (see Table 2). The averages of the regulation success scores calculated from these pre- and post-regulation ratings are available in Table 3.

**Table 2.** The intensity of aversion pre-post regulation based on behavioral evaluation of emotion regulation

	Ratings before regulation		Ratings after regulation		<i>t</i>	<i>p</i>
	Mean	SD	Mean	SD		
Neutral pictures	0.49	0.77	0.46	0.76	1.86	n.s.
Negative pictures "Maintain"	3.10	0.88	3.16	0.87	-0.92	n.s.
Negative picture "Decrease"	3.06	0.95	2.24	0.83	4.99	**
Negative picture "Increase"	2.83	0.87	3.58	0.98	-7.13	**

SD= standard deviation; n.s.= non significant; \*\* $p \leq 0.01$

**Table 3.** Average success frequency according to the regulation instruction ‘maintain’, ‘decrease’, and ‘increase’.<sup>4</sup>

	Mean	SD
Success frequency 'Maintain'	0.82	0.20
Success frequency 'Decrease'	0.73	0.27
Success frequency 'Increase'	0.63	0.25

SD= standard deviation

<sup>4</sup> See 'Calculation of regulation success' in the Method section

## **Whole scalp regions FFT analysis**

### ***Low theta (3-5.5 Hz induction phase)***

A repeated-measures ANOVA contrasting negative and neutral picture presentation was applied to test low-theta response to emotional valence during the emotional induction phase. Results showed a main effect of region ( $F(6.18)=3.37$ ;  $p < .05$   $\eta^2=.53$   $power=.83$ ) and a region x condition x hemisphere ( $F(6.18) = 3.01$ ;  $p < .05$   $\eta^2=.50$   $power=.78$ ) interaction. A subsidiary analysis revealed a condition x hemisphere ( $F(1.23)=5.09$ ;  $p < 0.05$ ) interaction only present in frontal electrodes. This interaction is reflected by larger theta power over left frontal regions in response to aversive pictures.

### ***Low theta (3-5.5 Hz regulation phase)***

The repeated-measures ANOVA applied to the low-theta power for the 1-3 sec post-regulation and the entire cortical regions revealed a main effect of condition ( $F(2.22) = 3.82$ ;  $p < .05$   $\eta^2=.25$   $power=.63$ ) that was explained by a significantly larger theta power in the increase condition compared to the maintain ( $p=.04$ ) condition when looking at all regions. The post-regulation effect on low-theta was more significant in the frontal ( $p<.04$ ) than over posterior regions ( $p=.07$ ) for the 1-3 sec period. Multiple comparisons across decrease-maintain conditions were not significant ( $p=.70$ ) across the 1-3 second period. There is also a significant region x hemisphere ( $F(6.18) = 2.93$ ;  $p < .05$   $\eta^2=.49$   $power=.76$ ) interaction revealing larger theta power over the right posterior regions during the 1-3 sec regulation period. Other ANOVAs were applied to the 3-5 sec and the 5-7 sec regulation but failed to reveal any significant main effect or interaction.

### ***High theta (5.5-8 Hz induction phase)***

A repeated-measures ANOVA contrasting negative and neutral picture presentation across the entire cortical regions was applied to test the impact of emotional pictures on high-theta values during the induction phase. Results showed a main effect of the region ( $F(6.18) = 2.99$ ;  $p < .05$ ;  $\eta^2=.50$   $power=.77$ ), revealing higher theta values over posterior regions than over frontocentral regions. However, other main effects and interactions failed to reach significance in the high theta value range during emotional induction.

### ***High theta (5.5-8 Hz regulation phase)***

The repeated-measures ANOVA applied to the high-theta power for the 1-3 sec post-regulation, and the entire cortical regions revealed a main effect of regions ( $F(6.18) = 6.12$ ;  $p < .005$   $\eta^2=.67$   $power=.98$ ) revealing more extensive power for posterior regions (parietal and parietal-occipital) compared to anterior regions (frontal and frontocentral). Other ANOVAs were applied to the 3-5 sec period but failed to reveal any significant main effect or interaction. Finally, the repeated measures ANOVA was applied to the 5-7 sec post-regulation, and the entire cortical regions revealed a main region effect ( $F(6.18) = 5.43$ ;  $p < .005$   $\eta^2=.64$   $power=.97$ ), exposing larger high-theta power over posterior regions (parietal and parietal-occipital) than over anterior regions (frontal and frontocentral). Furthermore, a significant main effect of condition ( $F(2.22) = 3.63$ ;  $p < .05$   $\eta^2=.25$   $power=.60$ ) was present. Moreover, significantly larger theta power was found in response to the 'increase' condition compared to the 'maintain' ( $p=.05$ ) condition across all regions. Multiple comparisons between decrease and increase conditions revealed a tendency toward significance ( $p=.07$ ), but the decrease-maintain comparison was statistically non-significant ( $p= 1$ ).

### ***Alpha (8-13 Hz induction phase)***

A repeated-measures ANOVA contrasting negative and neutral picture presentation across the entire cortical regions was applied to test the impact of emotional valence on alpha during the induction phase. Results showed a main effect of the region ( $F(6.18) = 13.16$ ;  $p < .001$ ;  $\eta^2=.81$   $power=1.0$ ) revealing higher alpha values over posterior regions (parietal, parietal-occipital, and occipital) than over anterior regions (anterior-frontal and frontal-central). Other main effects of emotional valence and interactions failed to reach significance on the alpha values during the induction phase.

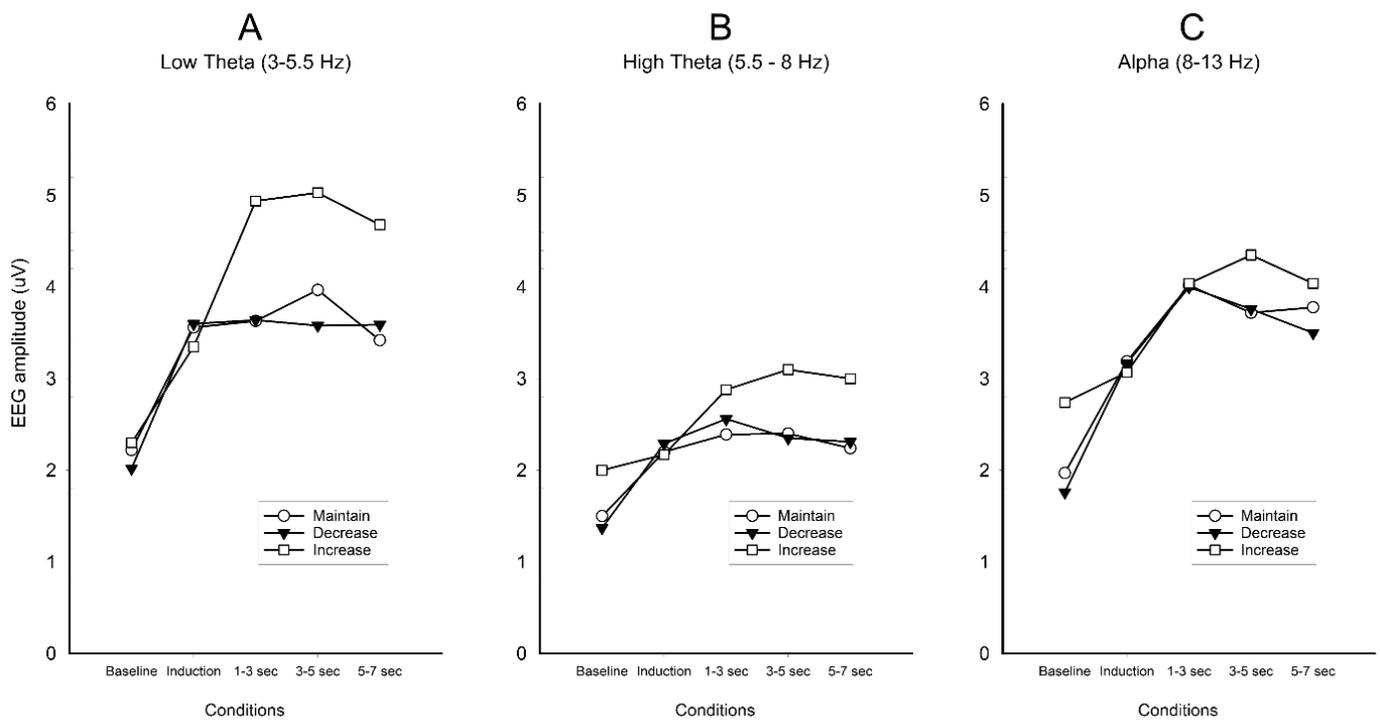
### ***Alpha (8-13 Hz regulation phase)***

The repeated-measures ANOVA applied to the alpha powerband for all periods post-regulation across the entire cortical regions revealed a main effect of regions for the 1-3 sec ( $F(6.18) = 6.10$ ;  $p < .001$   $\eta^2=.67$   $power=.98$ ), the 3-5 sec ( $F(6.18) = 7.62$ ;  $p < .001$   $\eta^2=.72$   $power=.99$ ) and the 5-7 sec period ( $F(6.18) = 7.53$ ;  $p < .001$   $\eta^2=.71$   $power=.99$ ) revealing that the alpha power activity was more prominent over posterior than over anterior regions for all time-

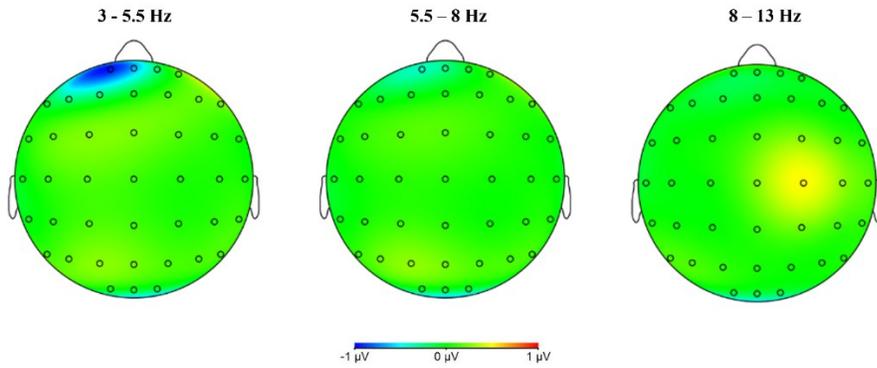
periods. The condition effect failed to reach significance for all three post-regulation periods of the alpha band.

These results are illustrated in Figure 2, presenting the low theta, high theta and alpha power spectral amplitude on all the electrodes for each regulation condition. The analysis of the average over all electrodes of low theta, high theta, and alpha power between baseline, induction, and regulation for negative pictures can be found in Appendix G. In addition, the voltage maps are consistent with the low theta, high theta and alpha FFT analysis for both the negative-neutral contrasts during induction (Figure 3) and the increase-maintain and decrease-maintain contrasts during regulation (Figure 4).

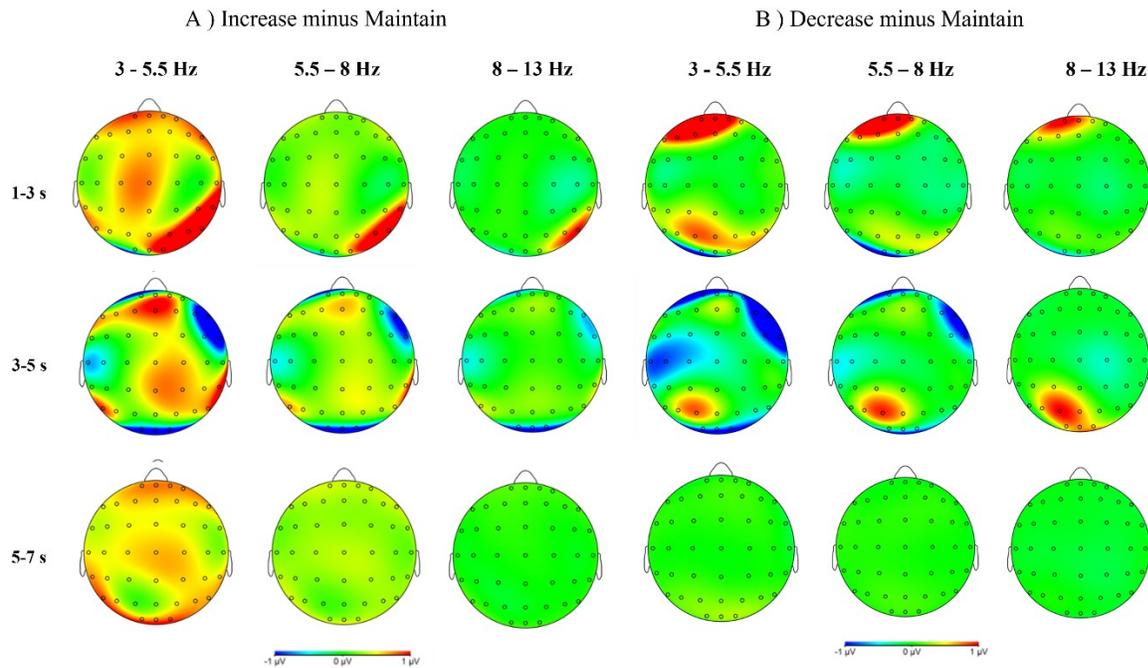
**Figure 2.** Low Theta (Panel A), High Theta (Panel B) and Alpha (Panel C) power spectral amplitude in response to each regulation condition (maintain, decrease, increase) for negative pictures in function of baseline, induction and regulation segments showing a larger theta power during the increase regulation condition compared to the maintain and decrease.



**Figure 3.** Scalp topography of the EEG activities contrasts negative – neutral pictures during induction for low theta (3 – 5.5 Hz), high theta (5.5 – 8 Hz) and alpha (8 - 13 Hz).



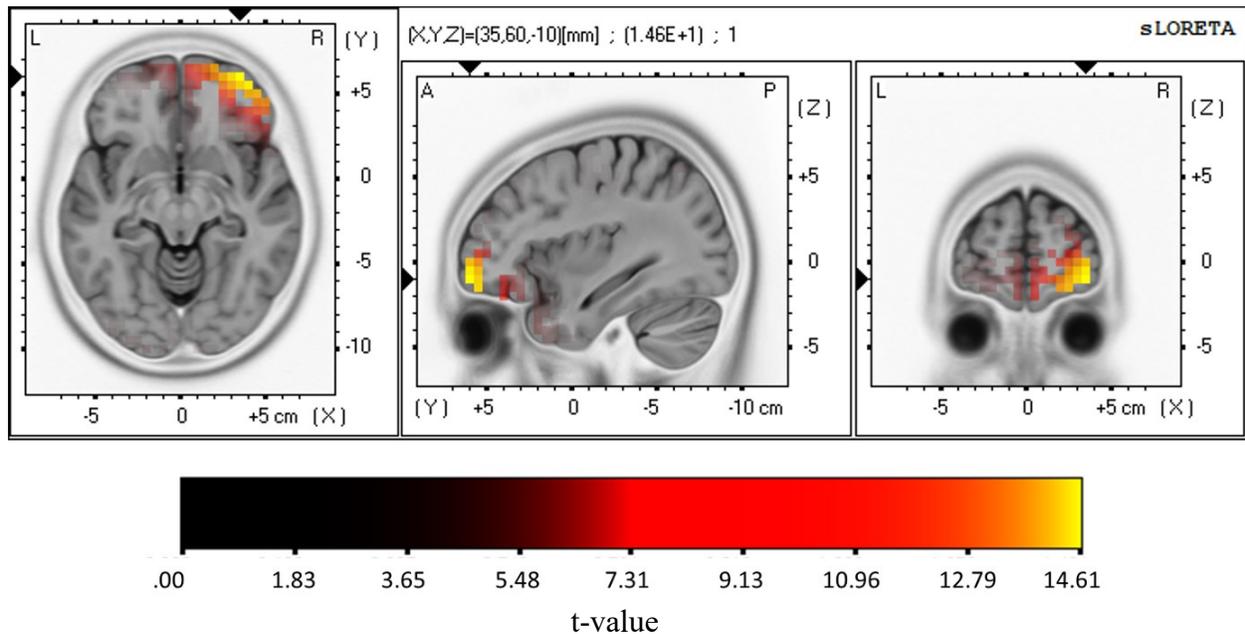
**Figure 4.** Scalp topography distribution of the increase–maintain contrast (panel A) and decrease –maintain contrast (panel B) for the 1-3s, 3-5s and 5-7s post-regulation phases for low theta (3 – 5.5 Hz), high theta (5.5 – 8 Hz) and alpha (8 - 13 Hz).



## Source localization

For the low theta (3 to 5.5 Hz), the analyses followed the results of the whole scalp regions FFT analysis since significant current density differences (threshold  $t$ -stats = 14.28,  $p < 0.05$ ) between increase and maintain (increase > maintain) was significant between 1 to 3 sec, in the middle frontal near the ventrolateral prefrontal cortex (MNI coordinates [x, y, z = 35, 60, -10], Brodmann area 10. In contrast with the whole scalp regions FFT analysis for high theta (5.5 to 8 Hz), no significant differences between increase and maintain (increase > maintain) were found between 5 to 7 sec. The results of source localization are demonstrated in Figure 5.

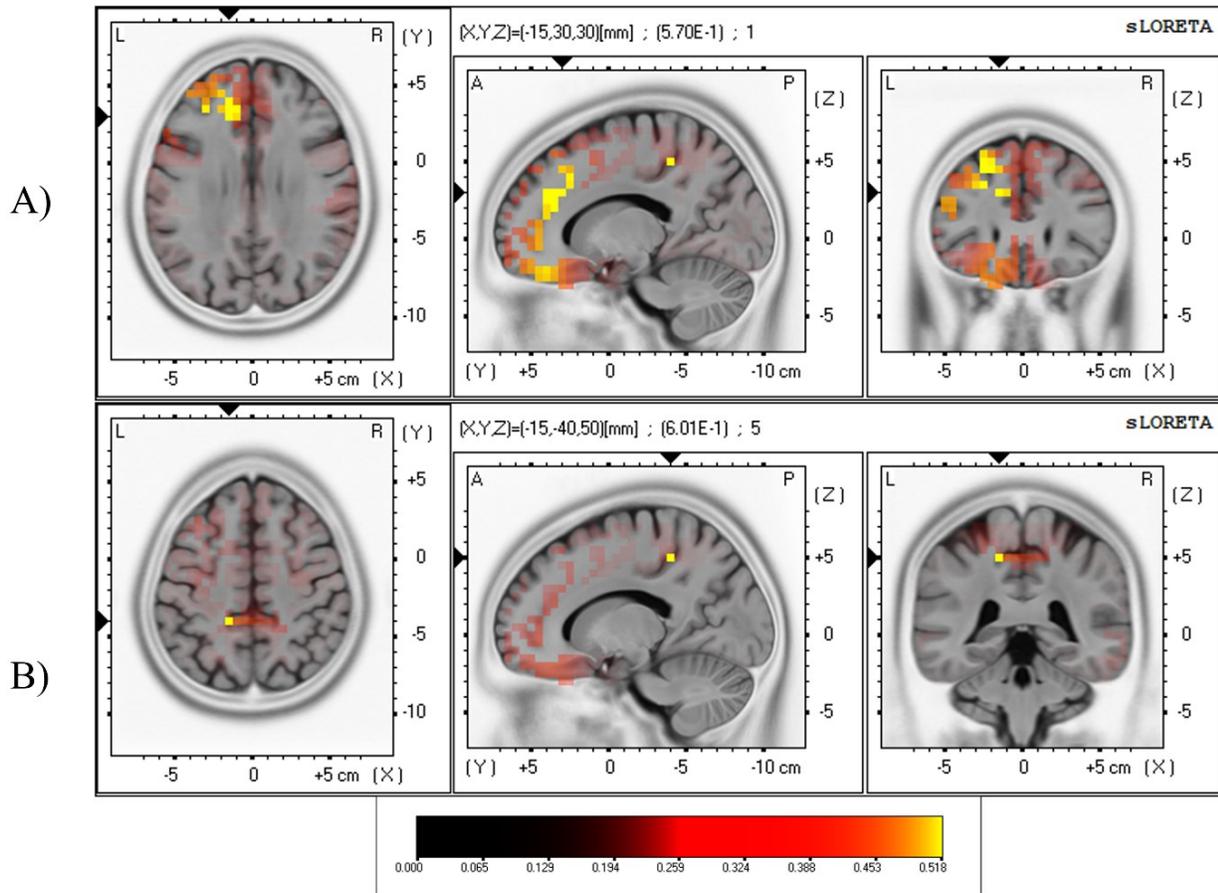
**Figure 5.** The yellow area represents voxels with the greater significance of low theta during the emotion regulation between 1 to 3 sec with increase > maintain, located in the middle frontal gyrus (MNI coordinates [x, y, z = 35, 60, -10], Brodmann area 10 (threshold  $t$ -stats = 14.28,  $p < 0.05$ ).



## **Theta and behavioral data**

Regression analyses between current density theta differences between increase and maintain (increase > maintain). Scores of emotion regulation success during the task (expressed as the frequency of successful emotion regulation according to the instruction for each participant) revealed anatomical regions with statistically significant regression equations, namely the medial frontal gyrus (MNI coordinates [x, y, z = -15, 30, 30], Brodmann area 32 ( $r = .57$ ,  $p = 0.035$ ) that is situated in the dorsal anterior cingulate cortex and the paracentral lobule (MNI coordinates [x, y, z = -15, -40, 50], Brodmann area 5 ( $r = .60$ ,  $p < 0.05$ ) as illustrated in Figure 5.

**Figure 6.** The yellow area represents voxels with more significant correlations between low theta during the emotion regulation between 1 to 3 sec with increase > maintain and the success of regulation during the task, located in the middle frontal gyrus (Panel A); MNI coordinates [x, y, z = -15, 30, 30], Brodmann area 32 ( $r = .57$ ,  $p = 0.035$ ) and the paracentral lobule (Panel B; MNI coordinates [x, y, z = -15, -40, 50], Brodmann area 5 ( $r = .60$ ,  $p = 0.035$ ).



## Discussion

Consistent with our hypothesis, we found that the cognitive reappraisal of aversive pictures is related to an increase in frontal theta oscillations during the emotion regulation phase and is positively correlated to the success of emotion regulation. More precisely, we corroborate that cognitive reappraisal of aversive pictures is related to an increase in theta oscillations, observed only in the ‘increase’ condition. Furthermore, we split the theta rhythm into low (3 to 5.5 Hz) and high theta (5.5 to 8 Hz) based on different modulations found in previous studies (Ertl et al., 2013; Fellinger et al., 2011; Salisbury & Taylor, 2012). Our results revealed that the low-theta activity at 1-3 sec post-regulation showed higher amplitude to the ‘increase’ than the ‘maintain’ condition, whereas the high-theta showed the same effect, but later at 5-7 sec post-regulation period. In a similar protocol, a low-theta increase was also found in voltage maps contrasting emotion regulation conditions (Ertl et al., 2013). In this prior study using cognitive reappraisal, they analyzed differences across conditions during the regulation phase over the Fz electrode, leading to a significantly higher theta activity in response to ‘decrease’ and ‘increase’ than the ‘maintain’ condition. Other studies also found an increase in theta oscillations when regulating emotions via distraction (Uusberg et al., 2014) and distancing (Sulpizio et al., 2021). Our sLORETA analyses of that low-theta oscillation during the upregulation condition between 1 to 3 s resulted in significant activations in the middle frontal gyrus, consistent with whole scalp FFT analysis and findings of recent fMRI studies (see meta-analysis from Buhle et al., 2014), from EEG studies using source localization (Ertl et al., 2013; Kitaura et al., 2017) and EEG/PET coupling (Pizzagalli et al., 2003). Our result of a generator near the ventrolateral prefrontal cortex, related to the upregulation of emotions, is consistent with some past evidence that the prefrontal region is the source of theta activity in certain states (Hayashi et al., 1987; Lang et al., 1997). Recent works showed that significant theta oscillations are associated with the interaction between the amygdala and the prefrontal cortex during emotional processes in the direction of inhibition of the amygdala, a structure responsible for emotion induction processes (Lesting et al., 2011). In addition, our main condition effect, during upregulation at 1-3 seconds, was correlated with the regulation success in the dorsal anterior cingulate cortex, consistent with previous studies placing a portion of the theta oscillation generators in this region (Hong et al., 2020; Kitaura et al., 2017; Pizzagalli et al., 2003).

With our data, only up-regulation showed significant differences in theta activities compared to when participants were not regulating. Some fMRI studies supported the hypothesis of overlapping cerebral networks involved in down- and up-regulation processes (Ochsner et al., 2004; Schulze et al., 2011). The inferior frontal gyrus and the lateral prefrontal cortex seem involved in both regulation conditions with some activation differences, indicating a partial, not total, overlap of the neural networks. However, Eippert et al. (2007) showed comparable findings by combining fMRI, startle eyeblink and skin conductance during up-or down-regulation with cognitive reappraisal. Their results revealed that startle eyeblink responses in successful regulators and skin conductance were amplified only during upregulation, and regulation success correlated positively with amygdala activity during upregulation. A more recent study by Wiemer et al. (2021) also showed similar results that directly compared up-and down-regulation of fear by cognitive reappraisal with peripheral measures of heart rate and pupil dilation. Similar to our EEG results, their findings revealed that heart rate and pupil dilation increased during up-regulation, but no reduction was observed during down-regulation, suggesting that upregulation is more efficient than down-regulation at the physiological level. In the current study, we proposed to investigate further the relationship between regulation success and whole brain regions. The regression between source localization and regulation success helped us to identify a significant relationship between upregulation and regions near the dorsal anterior cingulate cortex.

The analysis of theta rhythm during the pre-regulation induction phase was added to see if theta is sensitive to emotional arousal or, more specifically, to emotion regulation. Our analyses of the induction phase revealed an effect of emotional valence showing larger left frontal low theta in response to negative pictures. This effect is consistent with Aftanas et al. (2001), who provided evidence that early anterior theta synchronization activity reflects differential involvement of the left frontal regions in the discrimination between positive and negative valences. Theta oscillations have been found to correlate with a great variety of behavioral, cognitive and emotional variables, but according to a review by G. G. Knyazev (2007), their main domains seem to be centred on memory and emotion regulation. However, the temporal dynamics associated with the regulation of emotional stimuli were less tackled in past studies (Lapomarda et al., 2022), plus the comparison with other oscillations within the same protocol was not made systematically during emotion regulation, which led us to our next question.

## **The specificity of Theta and Alpha EEG rhythms in emotion regulation**

Contrary to a relatively high sensitivity to emotion upregulation of theta oscillations, our protocol's alpha oscillations were non-sensitive to emotional induction and regulation. Our results revealed a prominence of alpha activity distributed more prominently over the posterior regions. Evidence from EEG, magnetoencephalographic (MEG) and PET investigations imply that alpha rhythm is mainly generated over posterior brain regions (Hari, 1997; Sadato et al., 1998). This type of alpha oscillation is involved in selective attention to environmental stimuli, and it has been repeatedly shown that topographically widespread lower-alpha desynchronization reflects general task demands and selective attention processes (Pfurtscheller & Lopes da Silva, 1999). Selective attention is the capacity to process target stimuli and ignore other events. According to Klimesch (2012), alpha-band oscillations have primary functions of inhibition and timing related to fundamental processes of attention, such as suppression and selection, which enable the ability to be consciously oriented in time, space, and context. However, this large body of evidence has been largely overlooked in affective neuroscience.

Many studies have associated the alpha rhythm with affective attentional mechanisms (Uusberg et al., 2013), and it seems that alpha oscillations could play a unique function in the maintenance of attention to environmental stimuli and, potentially, emotional salience. Therefore, one might expect a difference in alpha activity between neutral and aversive pictures during emotional induction. Also, the previously uncovered modulations of alpha power during reappraisal contradicted each other in studies between a left frontal alpha asymmetry (Choi et al., 2016; Li et al., 2021; Papousek et al., 2017) and an increase in frontal alpha activity (Parvaz et al., 2012), or no modulation (Tolegenova et al., 2014). To confirm the specific role of the alpha rhythm in induction and not in emotion regulation, we performed a whole-brain analysis. Unlike the theta rhythm, the alpha rhythm did not appear involved in emotional induction or emotion regulation. However, other studies also found no relationships between alpha oscillations and emotion. Congruent with our results but with a different protocol, Jacobs and Friedman (2004) investigated the effects of relaxation techniques on theta and alpha EEG activity. They found modulations in theta but not alpha oscillations, which were associated with a reduction in the brain arousal system. Furthermore, the studies that had found differences in alpha activity according to the emotional salience of the pictures had studied very early time windows at around 300 ms to 1 s after the

stimulus presentation (Aftanas et al., 2002; De Cesarei & Codispoti, 2011). Considering that in the current study, the comparisons of the induction phase were made on the averages of the activities over the whole 5s segment with the first second removed, not to regard the previously evoked potentials, it was challenging to observe the early attentional mechanisms.

### **Limitations and Future Directions**

The activity of the amygdala cannot be directly addressed using EEG and source localization since it is a limbic structure. Plus, the participants' self-reported regulation success assessment was subjective and may have been influenced by the fact that participants were asked to rate their aversion intensity at the end of each trial and not at the end of each phase. Future studies might add physiological and subjective validation for the success of regulation, such as skin conductance, heart rate and pupil dilation or startle eyeblink (Eippert et al., 2007; Wiemer et al., 2021) to reflect limbic and amygdala activation.

In addition, this study could be extended to populations with neuropsychiatric disorders characterized by emotion regulation deficits (O'Driscoll et al., 2014; Zilverstand et al., 2017). Future studies may also investigate biological sex and gender differences (McRae et al., 2008; Nolen-Hoeksema, 2012; Whittle et al., 2011) and the extent to the investigation of brain oscillations in emotion regulation with other frequencies having possible implications such as beta and gamma (Kang et al., 2014; G. G. Knyazev, 2007).

Another avenue would be to couple EEG with fMRI or PET to combine EEG's temporal resolution with brain imaging spatial resolution (Jaspers-Fayer et al., 2012; Nguyen et al., 2019) and use connectivity procedures to assess the directionality of the interactions between brain regions. In line with claims made by previous models of emotion regulation (Ochsner et al., 2012), a systematic review using connectivity findings supported the assumption that effortful up-or down-regulation of emotion involves changes in connectivity, particularly between the amygdala, the dorsolateral prefrontal cortex and the inferior frontal gyrus (Underwood et al., 2021). However, this review also highlighted exceptions and evidence that challenge the assumption that primarily prefrontal areas exert directional effects on other regions. The modulatory connections between regions involved in emotion regulation may be more nuanced, but neuroimaging and psychophysiological investigations are needed to clarify these challenging questions.

## **Conclusion**

The present study replicates and extends prior findings using quantitative EEG and low-theta oscillations. However, the novelty of the current study lies in the use of larger spatial resolution and more detailed analyses of the whole scalp, the induction phase, and the addition of the alpha oscillation. Based on our results, it is logical to infer that emotion upregulation involves the theta rhythm. More precisely, we can also conclude that the low-theta rhythm was involved in specific emotion regulation processes that appear at a definite time during reappraisal, whereas the alpha rhythm was not altered by emotion induction and regulation. Moreover, our results confirm the findings of a generator located in the ventrolateral prefrontal cortex and the dorsal anterior cingulate cortex during the emotion upregulation consistent with the functional imaging literature in emotion regulation. Thus, time-frequency analyses constitute a vital and promising tool for better understanding neural mechanisms underlying emotion regulation processes.

**References (see in « Bibliographie »)**

## Chapitre III. Discussion

### 3.1. Discussion générale

#### 3.1.1. Synthèse des résultats

Conformément à notre hypothèse, la réévaluation cognitive des images déplaisantes était liée à une augmentation des oscillations thêta (3-8 Hz), mais cette constatation n'a été observée que dans la condition « augmenter ». Nos résultats ont montré que l'activité thêta de basse fréquence (3 – 5,5 Hz) survenant à une latence comprise entre 1 et 3 s après la régulation, présentait une amplitude plus élevée pour la condition « augmenter » que pour la condition « maintenir ». Par ailleurs, l'activité thêta de plus haute fréquence (5,5 – 8 Hz) présentait le même effet, mais plus tard entre 5 et 7 s après le début de la régulation. De plus, notre principal effet de condition, lors de la régulation à la hausse entre 1 et 3 s, était corrélé avec le succès de la régulation dans les régions frontales. Nos analyses de localisation de sources sLORETA ont montré que ces oscillations thêta bas sont liées à des activations significatives dans le cortex préfrontal ventrolatéral. Enfin, aucune modulation significative n'a été constatée pour les oscillations alpha (8-13 Hz) durant l'induction (après la 1<sup>ère</sup> seconde de présentation de l'image) et la régulation émotionnelle.

Dans un protocole similaire, une augmentation de l'activité thêta basse frontale avait été constatée dans les cartes temps-fréquences contrastant les conditions de régulation des émotions (Ertl et al., 2013). Cependant, les différences entre les conditions lors de la phase de régulation avaient été analysées uniquement sur l'électrode frontale Fz. Ceci conduisait à une activité thêta significativement plus élevée non seulement en réponse à la condition « augmenter », mais aussi « diminuer » en comparaison à la condition de contrôle « maintenir ». La principale différence avec nos résultats réside dans la modulation des deux conditions de régulation contre seulement une dans la condition « augmenter » et une modulation plus tardive autour de 3 à 5 s contre 1 à 3 s dans notre étude. Aussi, nos analyses des régions en entier, et non seulement de l'électrode Fz, ont permis de confirmer que l'effet de la régulation était plus grand dans les zones frontales que les zones postérieures dans le thêta bas entre 1 et 3 s.

Par ailleurs, le rythme thêta a été subdivisé en thêta bas (3 à 5,5 Hz) et thêta haut (5,5 à 8 Hz) en se basant sur les différentes modulations trouvées lors de différents états de conscience

(Fellinger et al., 2011) et lors de tâches mnésiques (Eckart et al., 2014; Salisbury & Taylor, 2012). Dans l'étude de Ertl et al. (2013), l'examen des cartes temps-fréquences contrastant les conditions de régulation avait abouti à la constatation qu'aucune modulation significative ne s'était produite au-delà de 5 Hz. En conséquence, leurs analyses s'étaient concentrées sur les oscillations thêta autour de 4 Hz lors de la régulation émotionnelle. Pareillement à ces études, des modulations différentes ont été mises à jour selon le thêta bas et haut lors de nos analyses. Les modulations des oscillations thêta lors de la régulation émotionnelle étaient plus fortes dans le bas thêta avec un maximum entre 1 et 3 s tandis que le maximum se situait entre 5 et 7 s pour le thêta haut. Il paraît donc intéressant de distinguer les bandes thêta en thêta bas et thêta haut lors de futures études afin d'observer les modulations lors de diverses tâches cognitives.

Afin de vérifier si le rythme alpha connu pour être impliqué dans l'attention émotionnelle était peu impliqué dans la régulation des émotions, une analyse topographique entière pour le rythme alpha a été effectuée. Contrairement à une sensibilité relativement spécifique à la régulation émotionnelle à la hausse des oscillations thêta, les oscillations alpha (8-13 Hz) étaient non sensibles à l'induction et à la régulation émotionnelle.

### ***3.1.2. Spécificité de thêta dans la régulation émotionnelle à la hausse : réévaluation cognitive et déploiement attentionnel***

Contrairement à certaines études sur la réévaluation cognitive (Ertl et al., 2013; Uusberg et al., 2014; Wei et al., 2017), aucune modulation significative de l'activité thêta basse et haute que ce soit au niveau des électrodes frontales ou postérieures n'a été constatée dans la condition « diminuer » en comparaison à la condition « maintenir ». Toutefois, les études étaient incohérentes concernant une modulation du thêta dans la réévaluation cognitive à la baisse. Ainsi, ces études ont souligné une augmentation significative du thêta frontal entre 3 et 5 s (Ertl et al., 2013), une diminution du thêta postérieur ou occipito-pariétal entre 1 à 4 s (Uusberg et al., 2014) ou encore une diminution du thêta frontal et centropariétal (Wei et al., 2017), comme détaillé ci-contre.

Dans un protocole presque similaire au nôtre de réévaluation cognitive, mais avec une condition de régulation à la baisse seulement, une diminution des oscillations thêta frontocentrales et centropariétales lors de la régulation a été constatée (Wei et al., 2017). L'hypothèse de Wei et al. (2017) était que la diminution d'amplitude des oscillations thêta centropariétales serait

expliquée par une diminution de l'attention envers les stimuli désagréables au cours des étapes ultérieures de la réévaluation à la baisse des émotions. En effet, le détournement de l'attention avait été précédemment associé à une diminution du thêta, mais dans les zones postérieures (Uusberg et al., 2014; Zhang et al., 2013). Pour arriver à cette conclusion, Uusberg et al. (2014) ont étudié à la fois la réévaluation cognitive et la distraction attentionnelle, stratégie de déploiement attentionnel consistant à penser à un contenu sans rapport avec les images négatives telles que des images, des dessins géométriques ou bien des scènes de leur quartier. Une diminution des pics d'activité thêta occipitaux, qui avait été antérieurement provoquée par l'induction émotionnelle, a été montrée de manière précoce (350-500 ms) seulement pour la distraction et plus tardivement (1 à 4 s) pour la réévaluation à la baisse. De même, une atténuation précoce de l'activité thêta, qui avait été augmentée par les stimuli émotionnels lors de l'induction, a été montrée dans un autre paradigme de distraction avec une tâche de comptage (Zhang et al., 2013). La distraction réduirait ainsi les ressources attentionnelles dédiées aux stimuli désagréables de manière précoce, tandis que la réévaluation permettrait de changer la signification affective des stimuli, et plus tardivement, de diminuer les mécanismes d'attention postérieurs envers les stimuli désagréables.

Néanmoins, les modulations thêta postérieures lors de l'utilisation de différentes formes de déploiement attentionnel diffèrent selon les études. Notamment, des augmentations de l'activité thêta postérieure avaient été montrées dans un paradigme de distanciation. Cette stratégie froide est une forme « d'état d'esprit » qui peut faire penser à la pleine conscience, technique de relaxation qui serait liée à une augmentation de l'activité thêta postérieure (Cahn & Polich, 2006; Chiesa & Serretti, 2010). L'augmentation de l'activité thêta postérieure serait associée à une réduction générale de l'excitation cérébrale lors de la relaxation (Jacobs & Friedman, 2004). En bref, l'activité thêta occipitale serait associée à des augmentations ou à des diminutions, selon les stratégies de régulation à la baisse, plus ou moins tardivement, et ceci, en lien avec l'attention envers les stimuli émotionnels. Dans notre étude, aucune modulation significative de l'activité thêta occipitale n'a été constatée lors de la régulation à la baisse. Les effets de la régulation émotionnelle à la baisse, selon les stratégies, restent donc à vérifier avec un protocole approprié.

L'absence de modulation significative du thêta occipital lors de la régulation à la baisse pourrait s'expliquer par une régulation ressentie comme plus difficile en comparaison à la régulation à la hausse, comme l'ont montré des études antérieures (Ochsner et al., 2004). Les

auteurs avaient émis une hypothèse concernant les processus frontaux impliqués dans la régulation à la baisse trouvés dans des études précédentes par utilisation de l'IRMF (Gross, 1998; Ochsner et al., 2002a). La réévaluation à la baisse serait une stratégie particulièrement laborieuse, qui requiert une attention soutenue et un contrôle cognitif élevé. Elle perturberait le traitement des émotions négatives comme une tâche secondaire perturberait une tâche principale. Le sens des émotions et leur impact ne seraient donc pas modifiés intrinsèquement, mais le processus cognitif laborieux aurait suffisamment perturbé l'émotion pour provoquer une diminution de l'émotion négative (Ochsner et al., 2004). La régulation à la hausse impliquerait un contrôle cognitif accru qui augmenterait l'activité amygdalienne, tandis que la régulation à la baisse impliquerait des mécanismes attentionnels plus précoces qui seraient tout de même efficaces pour diminuer l'activité de l'amygdale.

À la lumière de nos résultats, orientés clairement vers un impact sélectif d'une régulation à la hausse, il est possible de questionner si nos participants ont pu catégoriser correctement les images ou s'ils ont compris les instructions de régulation. Il apparaît toutefois que les capacités de catégorisations des participants ne sont pas impliquées. Tout d'abord, nos résultats comportementaux ont montré que la valence des images était correctement catégorisée pendant la phase d'induction émotionnelle et que les évaluations des images déplaisantes et neutres se situaient dans la norme de l'International Affective Picture System (IAPS). De plus, les différences dans l'intensité d'aversion autorapportée envers les images entre l'induction et la fin de la régulation ont montré que les participants ont clairement réussi à réguler leurs émotions selon les instructions à la hausse, à la baisse ou en maintenant l'intensité. Plus précisément, l'intensité de l'aversion envers les images négatives dans la condition « augmenter » était plus élevée après qu'avant la régulation et l'inverse pour les images négatives dans la condition « diminuer ». Par ailleurs, les évaluations des images neutres et négatives dans la condition « maintenir » ne différaient pas significativement avant et après la régulation.

Nos participants ont rapporté avoir diminué leur expérience subjective lors de la réévaluation à la baisse des stimuli aversifs. De plus aucune modulation significative dans la gamme  $\theta$  n'a été observée pour ces stimuli. On peut donc supposer que des mécanismes attentionnels involontaires aient été mobilisés. Il est possible que les participants aient détourné leur attention en changeant la valence des stimuli lors de la régulation à la baisse. Par exemple, lors de la

présentation d'une image de personne avec un couteau, le fait de réinterpréter que la personne va cuisiner plutôt que tuer une tierce personne pourrait s'apparenter à orienter son attention vers des pensées neutres en s'éloignant du contexte initial. Au contraire, la régulation à la hausse pourrait impliquer de modifier l'intensité de l'émotion et non sa nature, mettant en jeu des mécanismes émotionnels et non attentionnels en premier lieu. Dans notre exemple, la personne qui réévaluerait à la hausse l'émotion resterait dans le contexte initial d'une personne menaçante avec un couteau, en s'imaginant que la victime pourrait être un proche ou elle-même.

Cette hypothèse serait congruente avec certaines études qui ont trouvé des résultats comparables aux nôtres (Eippert et al., 2007; Wiemer et al., 2021) avec des mesures différentes. Eippert et al. (2007) ont étudié la régulation à la hausse et à la baisse par réévaluation cognitive en utilisant l'IRMF, le clignement des yeux et la conductance de la peau. Leurs résultats ont révélé que les réponses au clignement oculaire du sursaut et la conductance de la peau étaient amplifiées. Cependant, cet effet était présent uniquement pendant la régulation à la hausse, et la réussite de la régulation était corrélée positivement avec l'activité de l'amygdale sélectivement pendant la régulation à la hausse. Une étude plus récente de Wiemer et al. (2021) a également confirmé ces résultats en comparant directement la régulation à la hausse et à la baisse de la peur par la réévaluation cognitive avec des mesures périphériques de la fréquence cardiaque et de la dilatation des pupilles. À l'instar de nos résultats EEG, leurs conclusions ont révélé que la fréquence cardiaque et la dilatation de la pupille augmentaient sélectivement au cours de la régulation à la hausse, mais qu'il n'y avait pas de réduction au cours de la régulation à la baisse.

### ***3.1.3. Localisation des sources génératrices***

Nos analyses sLORETA de l'oscillation thêta bas pendant la condition de réévaluation « augmenter » par rapport à « maintenir » entre 1 et 3 s ont montré des activations significatives dans le gyrus frontal moyen proche du cortex préfrontal ventrolatéral. Ces résultats sont cohérents avec nos analyses Fast Fourier Transform ou FFT du scalp entier à l'aide de ANOVA et avec les topographies qui avaient montré de plus grandes modulations dans la bande thêta au niveau des électrodes frontales dans ce segment temporel. L'ajout d'électrodes passant de 32 dans l'étude de Ertl et al. (2013) à 64 électrodes dans notre étude a permis une localisation des sources probablement plus précise.

Les mêmes régions génératrices d'oscillations thêta ont été repérées dans des études d'IRMf (méta-analyse de Buhle et al., 2014) et d'EEG utilisant la localisation de la source sLORETA (Ertl et al., 2013) et de couplage EEG/TEP montrant des similitudes entre les données sLORETA et les données TEP, technique possédant une plus grande résolution spatiale (Oakes et al., 2004; Pizzagalli et al., 2003). Notre résultat d'un générateur dans le cortex préfrontal ventrolatéral, lié à la régulation à la hausse des émotions, est cohérent avec certaines observations. Celles-ci montrent que la région préfrontale médiane du cortex contribue à générer une activité thêta lors du sommeil (Hayashi et al., 1987) et lors d'activités cognitives (Lang et al., 1987). Plus récemment, des oscillations thêta avaient aussi été localisées par sLORETA dans le gyrus frontal inférieur lors de tâches attentionnelles, laissant présumer que l'intégration des informations sensorielles, facilitée par les oscillations thêta, seraient localisées dans cette région (Kitaura et al., 2017). Aussi, des travaux sur des modèles animaux ont montré, par l'enregistrement de l'activité électrique locale par des électrodes unitaires, que des oscillations thêta plus importantes sont associées à un couplage entre l'amygdale et le cortex préfrontal lors de l'extinction (une forme de régulation à la baisse). Cet effet a été observé dans un paradigme de conditionnement à la peur, montrant une inhibition de l'amygdale (Lesting et al., 2011 ; Narayanan et al., 2011). Ces deux études utilisent un paradigme de conditionnement à la peur puis d'extinction de celle-ci par apprentissage. Alors que le couplage thêta entre l'amygdale et le cortex préfrontal augmente pendant le conditionnement à la peur, il diminue pendant l'apprentissage de l'extinction (qui pourrait s'apparenter à la régulation à la hausse). Ces données prises ensemble, avec celles de notre étude, vont dans le sens d'un générateur thêta dans les zones frontales impliquées dans la réévaluation cognitive et la modulation de l'amygdale lors de la régulation émotionnelle (Buhle et al., 2014).

#### ***3.1.4. Lien entre les données EEG et le succès de la régulation émotionnelle***

Le succès de la réévaluation cognitive a été mesuré par la fréquence d'une diminution ou d'une augmentation de l'intensité d'aversion envers l'image en accord avec les instructions de régulation. Cette mesure, utilisée dans l'étude de (Ertl et al., 2013), est un indicateur de l'efficacité de la régulation lors de la tâche. Nous avons mis en relation cette mesure comportementale avec les mesures électrophysiologiques. Une régression entre la localisation de source thêta et le succès de la régulation a permis de mettre en évidence des relations significatives entre la réussite de la régulation et les régions du cortex cingulaire antérieur dorsal. Ces résultats sont cohérents avec les

études précédentes qui replaçaient une partie des générateurs d'oscillations thêta dans ces régions (Hong et al., 2020; Kitaura et al., 2017; Pizzagalli et al., 2003).

### ***3.1.5. Rythme thêta lors de l'induction des émotions***

L'analyse du rythme thêta pendant la phase d'induction (précédent la régulation) a été ajoutée afin de voir si l'oscillation thêta est aussi sensible à l'induction émotionnelle. Nos analyses de la phase d'induction ont révélé un effet de la valence émotionnelle localisée et spécifique, montrant une activité thêta basse frontale dans l'hémisphère gauche plus importante en réponse aux images négatives. Cet effet est cohérent avec Aftanas et al. (2001), qui ont montré que l'activité de synchronisation thêta antérieure précoce reflète une implication différentielle des régions frontales gauches dans la discrimination entre les valences positives et négatives. Néanmoins, nos résultats en Annexe G et présentés dans la Figure 2 confirment que la période de régulation suscite une puissance thêta basse plus importante par rapport à l'induction et à la ligne de base (précédent l'induction émotionnelle). Ces résultats corroborent ainsi que les oscillations thêta bas sont plus liées à la régulation qu'à l'induction émotionnelle. D'autres preuves cohérentes suggèrent que les neurones des structures limbiques produisent une activité thêta lors des processus émotionnels (Aftanas et al., 2001; Nishitani, 2003; Paré, 2003).

Toutefois, les oscillations thêta associés aux régions hippocampiques et amygdaliennes lors de ces différentes tâches impliquaient à la fois les émotions et la mémoire. La recension de Paré (2003) notait que les oscillations thêta de l'amygdale avaient le rôle de facilitateur de la mémoire par une excitation émotionnelle. Par l'utilisation de la magnétoencéphalographie, Nishitani (2003) a montré des oscillations thêta dans l'hippocampe dont le rôle serait de faciliter les interactions entre l'amygdale et les zones impliquées dans la mémoire. De même, l'étude de Aftanas et al. (2001) avait trouvé des oscillations thêta plus fortes envers les images émotionnelles dans les régions frontales gauches, mais impliquait aussi de montrer les stimuli deux fois, ce qui a pu induire une reconnaissance mnésique orientée vers le contenu émotionnel la deuxième fois, en lien avec le rôle du thêta dans la mémoire (revue de Buzsáki, 2005). Aussi, des échanges bidirectionnels dans la bande thêta entre l'amygdale, le cortex préfrontal médial et l'hippocampe lors du sommeil paradoxal, mécanisme crucial dans la consolidation des traces mnésiques, ont été montrés dans une étude sur le sommeil (Popa et al., 2010). Par ailleurs, un couplage thêta entre des régions sous-corticales et corticales à longue distance avait été mis à jour dans l'intégration d'informations

sensorielles dans des composantes de contrôle cognitif lors de comportements moteurs complexes (Sauseng et al., 2007). En bref, les oscillations thêta refléteraient l'activation de processus cognitifs d'ordre supérieur associés aux émotions. Citons en exemple la mémoire, le traitement d'informations et le contrôle sur les émotions en intégrant des informations du système limbique, de l'hippocampe, de l'hypothalamus et du néocortex (Kirk & Mackay, 2003). Ceci expliquerait que les oscillations thêta soient corrélées à une grande variété de variables comportementales, émotionnelles ainsi que des processus cognitifs de plus haut niveau comme le contrôle cognitif, l'attention et l'inhibition (Knyazev, 2007).

Cependant, la dynamique temporelle associée à la régulation des stimuli émotionnels, comme proposée dans la présente étude, a été moins abordée dans les études antérieures (Lapomarda et al., 2022). La modulation des oscillations thêta bas frontales mise à jour lors de l'induction émotionnelle soutient l'hypothèse d'un rôle de la gamme thêta dans les processus émotionnels. Néanmoins, la différence de puissance thêta entre l'induction et la régulation en faveur de la régulation va dans le sens de notre hypothèse de départ d'un rôle plus spécifiquement lié à la régulation émotionnelle. Les oscillations thêta soutiendraient principalement la réévaluation cognitive, car ce processus d'ordre supérieur implique des fonctions de contrôle cognitif.

### ***3.1.6. Rythme alpha dans la régulation émotionnelle***

Nos résultats ont révélé une prééminence de l'activité alpha distribuée dans les régions postérieures lors de l'induction émotionnelle. Des études EEG en magnétoencéphalographie (MEG) et en TEP montrent d'ailleurs que le rythme alpha serait principalement généré dans les régions cérébrales postérieures (Hari, 1997; Sadato et al., 1998). Ce type d'oscillation serait impliqué dans l'attention sélective envers les stimuli environnementaux et reflète les exigences générales de la tâche (Dmochowski et al., 2012; Foxe & Snyder, 2011; G. G. Knyazev, 2007; Pfurtscheller & Lopes da Silva, 1999). L'attention sélective est la capacité à traiter des stimuli cibles et à ignorer d'autres événements. Ainsi, l'augmentation ou la diminution des émotions pourrait faciliter l'attention en supprimant activement les stimuli distrayants. Les stimuli émotionnels capteraient l'attention afin de bénéficier du meilleur traitement perceptif. Ils sont mieux codés, mémorisés, peuvent distraire l'attention focalisée sur un autre stimulus et peuvent même traiter un stimulus inconsciemment (Axelrod et al., 2015; Stein et al., 2014; Yang et al., 2011). Selon Klimesch (2012), les oscillations de la bande alpha ont également des fonctions

primaires d'inhibition et de synchronisation. Lesdites fonctions seraient liées aux processus fondamentaux de l'attention tels que la suppression et la sélection, qui permettent la capacité d'être consciemment orienté dans le temps, l'espace et le contexte.

Cependant, ces connaissances fondamentales restent principalement négligées dans les neurosciences affectives. Pourtant, les oscillations alpha pourraient jouer non seulement une fonction unique dans le maintien de l'attention aux stimuli environnementaux, mais aussi potentiellement à la saillance émotionnelle. À ce titre, plusieurs études ont associé le rythme alpha postérieur aux mécanismes attentionnels affectifs (Aftanas et al., 2004; Aftanas et al., 2002; De Cesarei & Codispoti, 2011; Uusberg et al., 2013). Malgré cela, les résultats de la recension montrent certaines contradictions avec tantôt une augmentation des oscillations alpha (De Cesarei & Codispoti, 2011; Uusberg et al., 2013), tantôt une diminution (Aftanas et al., 2004; Aftanas et al., 2002) ou aucune modulation lors de l'induction émotionnelle (Keil et al., 2001; Müller et al., 1999). Aussi, une asymétrie de l'activité frontale droite dans la gamme alpha a été constatée lors de la visualisation d'images déplaisantes en lien avec l'évitement dans plusieurs études (Coan & Allen, 2004; Harmon-Jones et al., 2010; Miller, 2013).

Malgré l'incohérence des résultats, nous avons émis l'hypothèse d'une différence dans l'activité alpha entre les images neutres et déplaisantes pendant l'induction émotionnelle. Nos résultats vont plutôt dans le sens des études de Müller et al. (1999) et Keil et al. (2001) puisqu'aucune modulation significative n'a été trouvée dans la bande alpha entre les images déplaisantes et neutres. Cependant, les études qui avaient trouvé des différences dans l'activité alpha en fonction du caractère émotionnel des images avaient étudié des fenêtres temporelles très précoces, de 300 ms à 1 s environ après la présentation du stimulus (Aftanas et al., 2002; De Cesarei & Codispoti, 2011). Aussi, comme évoquée précédemment, notre phase d'induction émotionnelle avait une durée de 5 s, et la 1<sup>ère</sup> seconde suivant la présentation de l'image avait été supprimée des analyses pour ne pas considérer les potentiels évoqués<sup>5</sup>. Il était donc difficile d'observer les mécanismes attentionnels précoces puisque les comparaisons entre les conditions sont faites sur les moyennes des activités sur tout ce segment temporel.

---

<sup>5</sup> Nous avons utilisé une procédure similaire à d'autres recherches, notamment les études de Ertl et al. (2013) et Wei et al. (2014)

Par ailleurs, aucune asymétrie frontale alpha n'a été mise à jour lors de la régulation à la hausse et à la baisse dans la présente étude. À l'inverse des études sur l'induction qui allaient dans le sens d'une asymétrie de l'activité frontale droite alpha en lien avec l'évitement (Coan & Allen, 2004; Harmon-Jones et al., 2010; Miller, 2013), une asymétrie frontale gauche avait été constatée lors de la régulation à la baisse des émotions (Chen et al., 2019; Choi et al., 2016; Goodman et al., 2013; Jackson et al., 2003; Li et al., 2021; Papousek et al., 2017; Parvaz et al., 2012; Wang et al., 2015). Plus spécifiquement, dans des paradigmes de réévaluation cognitive, Choi et al. (2016) et Li et al. (2021) avaient signalé une activité frontale gauche relative plus élevée lors de la réévaluation à la baisse d'images déplaisantes. Aussi, Parvaz et al. (2012) avaient trouvé une diminution de la puissance alpha frontale gauche relative pendant la réévaluation d'images à la baisse par rapport au maintien de l'émotion, indiquant une activité et un contrôle cognitif accrus. En effet, la diminution de la puissance alpha a été reconnue comme un indice d'activité cérébrale augmentée (Allen et al., 2004). Néanmoins, cet effet avait été constaté lors de la réévaluation à la baisse d'images négatives, mais aussi lors de la condition de contrôle de réévaluation d'images neutres. De même, Papousek et al. (2017) avaient constaté une asymétrie gauche frontale plus élevée lors de la réévaluation à la baisse, mais seulement chez les personnes dont les capacités de réévaluation étaient supérieures. Indépendamment des différences individuelles de capacité de réévaluation, aucun effet de condition sur l'asymétrie alpha n'avait été mis à jour dans cette étude. Par ailleurs, Tolegenova et al. (2014) avaient rapporté des modulations de la puissance frontale thêta et gamma. Toutefois ceux-ci ne rapportaient pas de différence dans la bande alpha, lors de la réévaluation à la baisse de scènes de films. Précédemment, Jacobs and Friedman (2004) ont proposé une étude portant sur les effets des techniques de relaxation sur l'activité EEG thêta et alpha. Leurs résultats ont mis en lumière des modulations dans le thêta, mais pas dans la bande de fréquence alpha associées à une réduction du système d'éveil cérébral.

En résumé, les résultats n'étaient pas unanimes concernant l'implication du rythme alpha dans la régulation émotionnelle à la baisse. À notre connaissance, aucune étude n'avait étudié les modulations d'alpha lors de la régulation à la hausse des émotions négatives. En cohérence avec les résultats de Tolegenova et al. (2014), nos analyses de la bande alpha ont permis de confirmer notre hypothèse de départ d'une absence de sensibilité de ce rythme dans la régulation émotionnelle à la baisse et à la hausse. Nos résultats militent dans le sens, par la même, d'une spécificité des oscillations thêta dans la régulation émotionnelle.

## **3.2. Limites et orientations futures**

### ***3.2.1. Limites méthodologiques***

À la fin de chaque essai, les participants notaient l'intensité de leur aversion envers les images avant la régulation et après la régulation. La fréquence de la régulation réussie des émotions selon les instructions mesurait le succès de la régulation. Cette évaluation est subjective et peut avoir été influencée par le fait qu'on ait demandé aux participants d'évaluer l'intensité de leur aversion à la fin de chaque essai et non à la fin de chaque phase. Les futures études pourraient ajouter des mesures physiologiques du succès de la régulation, telles que la conductance cutanée, la fréquence cardiaque, la dilatation de la pupille ou le clignement des yeux en sursaut (Eippert et al., 2007; Wiemer et al., 2021).

Par ailleurs, on peut soulever le fait que le protocole implique de regarder les images émotionnelles puis d'appliquer la régulation d'une émotion déjà suscitée. Au niveau méthodologique, la plupart des études sur la régulation émotionnelle utilisent les images issues de l'International Affective Picture System (IAPS). Peu d'études ont utilisé des matériaux de stimuli différents, tels que des films (Dennis & Solomon, 2010; Tolegenova et al., 2014). Les films sont pourtant considérés comme des stimuli dynamiques plus réalistes et efficaces pour provoquer une émotion que les images statiques. Une étude très récente de Romeo et al. (2022) a montré des différences dans l'activité oscillatoire lors de la génération des émotions entre le visionnement de clips vidéo ou d'images statiques. Par conséquent, les films provoqueraient une plus forte élicitation des émotions. Ceci milite en faveur de varier la méthodologie pour les rendre plus écologiques dans les futures études.

En outre, certaines études ont choisi de donner les instructions de régulation avant la présentation de chaque image (Grecucci, Giorgetta, et al., 2020; Sulpizio et al., 2021). Ainsi, les corrélats neurophysiologiques de la préparation à réaliser la stratégie de régulation peuvent être étudiés et différenciés de la régulation, en elle-même, qui débute lors de la présentation des stimuli. D'après les études en IRMf (Buhle et al., 2014), les régions frontales sélectionnent et mettent en œuvre la stratégie (effet de stratégie) ; puis, les structures limbiques génératrices des émotions, dont l'amygdale, sont régulées (effet de régulation) ; enfin, certaines régions contrôlent le succès de la régulation dont le cortex cingulaire. Sulpizio et al. (2021) avait constaté que l'effet de stratégie de

la distanciation augmentait la puissance thêta postérieure à partir de 500 ms tandis que l'effet de régulation diminuait les oscillations thêta et bêta (13 – 20 Hz) dans les régions postérieures. Les études futures pourraient étudier la réévaluation cognitive en intégrant cette différenciation d'effet stratégie/régulation.

### **3.2.2. Populations cliniques**

Cette étude a pour visée d'être étendue aux populations présentant des troubles neuropsychiatriques caractérisés par des déficits de régulation des émotions. La régulation émotionnelle est considérée comme un marqueur de santé mentale puisqu'elle permet la flexibilité dans les réponses comportementales, les réactions au stress et aux autres situations (Gross & Muñoz, 1995; Sapolsky, 2007). Sur le plan clinique, les déficits de régulation émotionnelle sont associés au développement et au maintien de nombreuses psychopathologies. Ces déficits sont, en conséquence, la cible de traitements prometteurs en psychiatrie clinique (Berking & Wupperman, 2012; Daddomo et al., 2018; Gross & Jazaieri, 2014; O'Driscoll et al., 2014; Sheppes et al., 2015).

Les déficits en réévaluation cognitive ont été mesurés dans plusieurs études et seraient présents chez les personnes souffrant de troubles de l'humeur, de troubles anxieux, de dépendance, de schizophrénie et de troubles de la personnalité notamment. D'après la revue de 32 études sur ces populations par Zilverstand et al. (2017), les déficits de régulation émotionnelle à la baisse se caractérisent au niveau neuronal par une activation plus faible des régions frontales liées au contrôle cognitif (cortex préfrontal ventrolatéral et dorsolatéral notamment) dans l'ensemble de ces populations cliniques. Ainsi, ils notent une hyperactivation de l'amygdale dans les troubles de l'humeur seulement et une activation plus faible dans le cortex cingulaire antérieur et le cortex pariétal inférieur/supérieur, impliqué dans la distribution de l'attention dans les troubles anxieux seulement. Par ailleurs, l'utilisation de la réévaluation cognitive à la baisse a été associée à une réduction des symptômes dépressifs (Augustine & Hemenover, 2009; Martin & Dahlen, 2005; Webb et al., 2012). La régulation à la hausse a moins été étudiée dans ces populations, malgré que la dérégulation émotionnelle à la hausse soit présente dans de nombreux troubles psychiatriques. Cette dérégulation se révélerait sous la forme d'une réactivité excessive aux stimuli émotionnels par exemple (Levy et al., 2006; van der Meer et al., 2009). Une autre étude a constaté une augmentation des régions frontales et de l'insula, lors d'hallucinations verbales auditives avec un contenu négatif chez les patients atteints de schizophrénie (Sommer et al., 2008). Par ailleurs, une

suractivation des régions corticolimbiques a été constatée en réponse à des stimuli neutres chez des patients atteints de schizophrénie avec une hypersensibilité anormale (Kohn et al., 2014). D'autres troubles et syndromes présentent des difficultés de régulation émotionnelle, notamment l'autisme, le syndrome d'Asperger, les troubles de déficits de l'attention/hyperactivité (Ito, 2004) et les traumatismes (Ehring & Quack, 2010) pour n'en citer quelques-uns.

Différents modèles thérapeutiques ont récemment intégré des techniques visant l'amélioration de la régulation émotionnelle (Grecucci et al., 2017; Grecucci, Messina, et al., 2020). Aussi, l'observation des traces de la régulation sur l'activité oscillatoire du cerveau pourrait constituer un moyen d'observation des effets de différentes thérapies. L'activité cérébrale au repos a été mesurée avant et après une séance, mettant à jour une augmentation des oscillations thêta et delta en lien avec la séance ciblant la régulation émotionnelle en comparaison à une séance sans régulation émotionnelle. Ces résultats suggèrent que l'activité cérébrale peut être modifiée à la suite d'un entraînement à la régulation (Lapomarda et al., 2022). À ce titre, une étude de Mulert et al. (2007) avait observé l'activité thêta au niveau du cortex cingulaire antérieur, zone médiatrice des régions frontales, lors de la régulation émotionnelle (Ochsner et al., 2012). Ces observations fonctionnelles furent obtenues à l'aide du logiciel de localisation de sources LORETA, en pré- et post- thérapie médicamenteuse par antidépresseurs chez des personnes souffrant de dépression majeure. D'autres différences dans l'activité thêta au repos avaient été trouvées entre les personnes qui répondaient et celles qui ne répondaient pas au traitement grâce à l'utilisation de LORETA. Le rythme thêta, contrairement aux autres bandes de fréquence, avait été précédemment trouvé plus grand dans le cortex cingulaire antérieur et les régions préfrontales chez des sujets témoins en comparaison à des personnes atteintes de dépression (Pizzagalli et al., 2003).

En conséquence, les études futures pourraient s'orienter vers la recherche processus électrophysiologiques, notamment dans la gamme thêta, avant et à la suite d'interventions thérapeutiques visant l'amélioration de la régulation émotionnelle. Aussi, les résultats qui renseignent des bases neurales et de la dynamique de la régulation émotionnelle peuvent servir de support au développement d'approches thérapeutiques innovatrices. Par exemple, le neurofeedback et la stimulation électrique transcrânienne permettraient de modifier les patrons d'oscillations relatifs à certains processus cognitifs perturbés dans des régions précises (Marshall et al., 2006; Salari et al., 2012) et pourraient donc s'appliquer à la régulation émotionnelle.

### 3.2.3. *Autres rythmes cérébraux*

Le protocole utilisé, à partir de l'étude de Ertl et al. (2013), pourrait permettre l'investigation des oscillations cérébrales dans la régulation des émotions dans d'autres fréquences. Des modulations avaient été trouvées lors de la régulation émotionnelle dans les gammes bêta (Tortella-Feliu et al., 2014), gamma (Popov et al., 2012) ou encore delta (Knyazev, 2012). Certaines études ont effectué des analyses temps-fréquences sur plusieurs bandes de fréquence (Sulpizio et al., 2021; Tolegenova et al., 2014) permettant de vérifier la spécificité d'un ou plusieurs rythmes dans la régulation émotionnelle. Sulpizio et al. (2021) avaient analysé les fréquences de 2 à 30 Hz. Ceux-ci avaient conclu à l'implication spécifique du rythme thêta postérieur lors de l'implémentation de la stratégie (effet de stratégie) et à une diminution dans les bandes thêta et bêta postérieures lors de la régulation des images (effet de régulation). De même, Tolegenova et al. (2014) ont analysé cinq bandes de fréquence et trouvé des modulations de la puissance frontale thêta et gamma, mais pas alpha, ni bêta lors de l'utilisation de la réévaluation de scènes de film. La prédominance des rythmes lents (comme delta : 1-3 Hz et thêta : 3-8 Hz) sur les rythmes rapides (comme bêta : 15-30 Hz) a été reconnue comme associée aux troubles de déficits de l'attention (Arns et al., 2013). Au vu du lien entre attention et émotion (Koole, 2009; Vuilleumier & Driver, 2007), les chercheurs se sont intéressés au rapport ondes lentes/rapides dans la régulation émotionnelle. Notamment, le rapport thêta/bêta frontal et pariétal au repos, inversement corrélé à l'attention, faciliterait la régulation émotionnelle (Tortella-Feliu et al., 2014). Par ailleurs, d'après une étude récente faite sur des enfants, un plus grand rapport delta/bêta serait lié à une régulation émotionnelle efficace (Myruski et al., 2022). L'étude du rapport ondes lente/rapide est une piste intéressante peu explorée à ce jour. Une autre piste serait l'étude du rythme mu qui est composé d'oscillations dans les zones sensorimotrices censées indexer la simulation d'actions lors du traitement visuel de ces actions (généralement autour de 9 à 11 Hz). Il a été montré que ce rythme est modulé par la perception de visages ayant différentes émotions (Moore et al., 2012). Des analyses temps-fréquence avec LORETA ou du couplage entre EEG ainsi qu'une méthode de neuroimagerie possédant une plus grande résolution spatiale pourraient approfondir nos résultats. Ainsi, il serait possible d'explorer l'implication de ce rythme dans la régulation émotionnelle interpersonnelle étant donné l'implication de celui-ci dans la visualisation des émotions d'autrui (Goldenberg et al., 2016; Nozaki & Mikolajczak, 2020; Porat et al., 2020).

Par ailleurs, il serait aussi intéressant d'étudier dans un même protocole plusieurs stratégies de régulation émotionnelle afin de démêler les bases neurophysiologiques impliquées dans la régulation en général et spécifiquement dans une ou plusieurs stratégies. Peu d'études ont comparé directement plusieurs stratégies et se concentraient généralement sur deux parmi la variété possible de stratégies (Choi et al., 2016; Jackson et al., 2000; Tolegenova et al., 2014; Uusberg et al., 2014).

#### ***3.2.4. Techniques d'acquisition et connectivité***

Au niveau des techniques d'acquisition, les futures études pourraient coupler l'EEG avec de l'IRMf ou de la TEP afin de profiter de combiner la très bonne résolution temporelle de l'EEG avec une plus grande résolution spatiale (Jaspers-Fayer et al., 2012; Nguyen et al., 2019; Oakes et al., 2004; Pizzagalli et al., 2003). L'acquisition de données dans les deux modalités permettrait de voir la façon dont les individus intègrent plusieurs sources d'informations simultanées grâce à un aperçu des dynamiques spatiales et temporelles (Seeley et al., 2015). Notamment, une étude couplant EEG-IRMf de Nguyen et al. (2019) a permis de confirmer les réseaux corticaux impliqués dans la régulation émotionnelle, dont le cortex préfrontal ventrolatéral, en précisant la dynamique temporelle des activations mises en jeu.

Une autre piste serait d'utiliser des procédures de connectivité pour évaluer la directionnalité des interactions entre les régions cérébrales. Conformément aux modèles neurobiologiques de régulation des émotions (Ochsner et al., 2012; Phillips et al., 2003), une revue systématique utilisant les résultats de la connectivité. Celle-ci a soutenu l'hypothèse selon laquelle la régulation à la hausse ou à la baisse des émotions implique des changements dans la connectivité, en particulier entre l'amygdale, le cortex préfrontal dorsolatéral et le gyrus frontal inférieur (Underwood et al., 2021). Cependant, cette revue a également mis en évidence des exceptions et des preuves qui remettent en cause l'hypothèse selon laquelle ce sont principalement les zones préfrontales qui exercent des effets directionnels sur les autres régions. Les connexions modulatrices entre les régions impliquées dans la régulation des émotions peuvent être plus nuancées. Des recherches supplémentaires en neuroimagerie et des investigations psychophysiologiques sont nécessaires pour clarifier ces questions complexes.

## Chapitre IV. Conclusion

La présente étude reproduit et étend partiellement les résultats antérieurs d'Ertl et al. (2013) en utilisant l'EEG quantitatif et les oscillations thêta. La nouveauté de l'étude actuelle réside dans l'utilisation d'une plus grande résolution spatiale et d'analyses plus détaillées de l'ensemble du cuir chevelu, de la phase d'induction et de l'ajout de l'oscillation alpha pour vérifier si le rythme alpha connu pour être impliqué dans l'attention émotionnelle était peu impliqué dans la régulation des émotions. Sur la base de nos résultats, il est logique de déduire que la régulation à la hausse des émotions impliquerait le rythme thêta. Plus précisément, le rythme thêta bas était impliqué dans des processus spécifiques de régulation des émotions qui apparaissent à un moment précis lors de la réévaluation des émotions, alors que le rythme alpha n'était pas modulé par l'induction et la régulation des émotions. De plus, nos résultats confirment l'existence d'un générateur des différences d'oscillations thêta situé près du cortex préfrontal ventrolatéral pendant la régulation à la hausse de l'émotion, conformément à la recension ayant trait à l'imagerie fonctionnelle, confirmant le rôle clé de la connectivité entre le cortex préfrontal et l'amygdale dans la régulation de l'émotion. Aussi, le succès de la régulation à la hausse pendant la tâche était corrélé avec l'activité thêta dans les régions du cortex cingulaire antérieur dorsal. Ainsi, nos résultats montrent que les analyses temps-fréquence constituent un outil essentiel pour mieux comprendre les mécanismes neuronaux qui sous-tendent les processus émotionnels.

## Bibliographie

- Adolphs, R. (2017). How should neuroscience study emotions? by distinguishing emotion states, concepts, and experiences. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12(1), 24-31. <https://doi.org/10.1093/scan/nsw153>
- Adrian, E. D., & Bronk, D. W. (1928). The discharge of impulses in motor nerve fibres. *The Journal of Physiology*, 66(1), 81-101. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1928.sp002509>
- Adrian, E. D., & Matthews, R. (1928). The action of light on the eye. *The Journal of Physiology*, 65(3), 273-298. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1928.sp002475>
- Aftanas, L. I., Reva, N. V., Varlamov, A. A., Pavlov, S. V., & Makhnev, V. P. (2004). Analysis of Evoked EEG Synchronization and Desynchronization in Conditions of Emotional Activation in Humans: Temporal and Topographic Characteristics. *Neuroscience and Behavioral Physiology*, 34(8), 859-867. <https://doi.org/10.1023/b:neab.0000038139.39812.eb>
- Aftanas, L. I., Varlamov, A. A., Pavlov, S. V., Makhnev, V. P., & Reva, N. V. (2001). Affective picture processing: event-related synchronization within individually defined human theta band is modulated by valence dimension. *Neuroscience Letters*, 303(2), 115-118. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(01\)01703-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(01)01703-7)
- Aftanas, L. I., Varlamov, A. A., Pavlov, S. V., Makhnev, V. P., & Reva, N. V. (2002). Time-dependent cortical asymmetries induced by emotional arousal: EEG analysis of event-related synchronization and desynchronization in individually defined frequency bands. *International Journal of Psychophysiology*, 44(1), 67-82. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(01\)00194-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(01)00194-5)
- Allen, J. J. B., Coan, J. A., & Nazarian, M. (2004). Issues and assumptions on the road from raw signals to metrics of frontal EEG asymmetry in emotion. *Biological Psychology*, 67(1), 183-218. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2004.03.007>

- Arns, M., Conners, C. K., & Kraemer, H. C. (2013). A decade of EEG Theta/Beta Ratio Research in ADHD: a meta-analysis. *J Atten Disord*, *17*(5), 374-383.  
<https://doi.org/10.1177/1087054712460087>
- Augustine, A. A., & Hemenover, S. H. (2009). On the relative effectiveness of affect regulation strategies: A meta-analysis. *Cognition and Emotion*, *23*(6), 1181-1220.  
<https://doi.org/10.1080/02699930802396556>
- Axelrod, V., Bar, M., & Rees, G. (2015). Exploring the unconscious using faces. *Trends Cogn Sci*, *19*(1), 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.11.003>
- Banks, S. J., Eddy, K. T., Angstadt, M., Nathan, P. J., & Phan, K. L. (2007). Amygdala-frontal connectivity during emotion regulation. *Soc Cogn Affect Neurosci*, *2*(4), 303-312.  
<https://doi.org/10.1093/scan/nsm029>
- Başar, E., & Güntekin, B. (2012). A short review of alpha activity in cognitive processes and in cognitive impairment. *International Journal of Psychophysiology*, *86*(1), 25-38.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.07.001>
- Bebko, G. M., Franconeri, S. L., Ochsner, K. N., & Chiao, J. Y. (2011). Look before you regulate: differential perceptual strategies underlying expressive suppression and cognitive reappraisal. *Emotion (Washington, D.C.)*, *11*(4), 732-742.  
<https://doi.org/10.1037/a0024009>
- Beck, A. T. (2005). The Current State of Cognitive Therapy. *Archives of General Psychiatry*, *62*(9), 953. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.62.9.953>
- Beck, A. T., & Dozois, D. J. A. (2011). Cognitive Therapy: Current Status and Future Directions. *Annual Review of Medicine*, *62*(1), 397-409. <https://doi.org/10.1146/annurev-med-052209-100032>
- Berboth, S., & Morawetz, C. (2021). Amygdala-prefrontal connectivity during emotion regulation: A meta-analysis of psychophysiological interactions. *Neuropsychologia*, *153*, 107767. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.107767>

- Berger, H. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, 87(1), 527-570. <https://doi.org/10.1007/bf01797193>
- Berking, M., & Wupperman, P. (2012). Emotion regulation and mental health: recent findings, current challenges, and future directions. *Current Opinion in Psychiatry*, 25(2), 128-134. <https://doi.org/10.1097/YCO.0b013e3283503669>
- 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)
- Braunstein, L. M., Gross, J. J., & Ochsner, K. N. (2017). Explicit and implicit emotion regulation: a multi-level framework. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 12(10), 1545-1557. <https://doi.org/10.1093/scan/nsx096>
- Brett, M., Christoff, K., Cusack, R., & Lancaster, J. (2001). Using Talairach atlas with the MNI template. *NeuroImage*, 13, 85-85. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(01\)91428-4](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(01)91428-4)
- Buckner, R. L., Krienen, F. M., & Yeo, B. T. T. (2013). Opportunities and limitations of intrinsic functional connectivity MRI. *Nature Neuroscience*, 16(7), 832-837. <https://doi.org/10.1038/nn.3423>
- Buhl, E. H., Tamás, G., & Fisahn, A. (1998). Cholinergic activation and tonic excitation induce persistent gamma oscillations in mouse somatosensory cortex<i>in vitro</i>. *The Journal of Physiology*, 513(1), 117-126. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.1998.117by.x>
- Buhle, J. T., Silvers, J. A., Wager, T. D., Lopez, R., Onyemekwu, C., Kober, H., Weber, J., & Ochsner, K. N. (2014). Cognitive Reappraisal of Emotion: A Meta-Analysis of Human Neuroimaging Studies. *Cerebral Cortex*, 24(11), 2981-2990. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht154>
- Buschman, T. J., & Miller, E. K. (2007). Top-Down Versus Bottom-Up Control of Attention in the Prefrontal and Posterior Parietal Cortices. *Science*, 315(5820), 1860-1862. <https://doi.org/10.1126/science.1138071>

- Buzsáki, G. (2005). Theta rhythm of navigation: Link between path integration and landmark navigation, episodic and semantic memory. *Hippocampus*, *15*(7), 827-840.  
<https://doi.org/10.1002/hipo.20113>
- Buzsáki, G., & Draguhn, A. (2004). Neuronal Oscillations in Cortical Networks. *Science*, *304*(5679), 1926-1929. <https://doi.org/10.1126/science.1099745>
- Cahn, B. R., & Polich, J. (2006). Meditation states and traits: EEG, ERP, and neuroimaging studies. *Psychol Bull*, *132*(2), 180-211. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.132.2.180>
- Campos, J. J., Campos, R. G., & Barrett, K. C. (1989). Emergent themes in the study of emotional development and emotion regulation. *Developmental Psychology*, *25*(3), 394-402. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.25.3.394>
- Cannon, R. L., Baldwin, D. R., Shaw, T. L., Diloreto, D. J., Phillips, S. M., Scruggs, A. M., & Riehl, T. C. (2012). Reliability of quantitative EEG (qEEG) measures and LORETA current source density at 30 days. *Neuroscience Letters*, *518*(1), 27-31.  
<https://doi.org/10.1016/j.neulet.2012.04.035>
- Cavanagh, J. F., & Frank, M. J. (2014). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, *18*(8), 414-421. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.04.012>
- Chatrian, G. E., Lettich, E., & Nelson, P. L. (1985). Ten Percent Electrode System for Topographic Studies of Spontaneous and Evoked EEG Activities. *American Journal of EEG Technology*, *25*(2), 83-92. <https://doi.org/10.1080/00029238.1985.11080163>
- Chen, Wang, K. P., Cheng, M. Y., Chang, Y. T., Huang, C. J., & Hung, T. M. (2019). Impact of emotional and motivational regulation on putting performance: a frontal alpha asymmetry study. *PeerJ*, *7*, e6777. <https://doi.org/10.7717/peerj.6777>
- Chiesa, A., & Serretti, A. (2010). A systematic review of neurobiological and clinical features of mindfulness meditations. *Psychol Med*, *40*(8), 1239-1252.  
<https://doi.org/10.1017/s0033291709991747>

- Choi, D., Sekiya, T., Minote, N., & Watanuki, S. (2016). Relative left frontal activity in reappraisal and suppression of negative emotion: Evidence from frontal alpha asymmetry (FAA). *International Journal of Psychophysiology*, *109*, 37-44.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2016.09.018>
- Coan, J. A., & Allen, J. J. B. (2004). Frontal EEG asymmetry as a moderator and mediator of emotion. *Biological Psychology*, *67*(1), 7-50.  
<https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2004.03.002>
- Cohen, M. X. (2014). A neural microcircuit for cognitive conflict detection and signaling. *Trends in Neurosciences*, *37*(9), 480-490.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tins.2014.06.004>
- Cooper, P. S., Karayanidis, F., McKewen, M., McLellan-Hall, S., Wong, A. S. W., Skippen, P., & Cavanagh, J. F. (2019). Frontal theta predicts specific cognitive control-induced behavioural changes beyond general reaction time slowing. *NeuroImage*, *189*, 130-140.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.01.022>
- Dadomo, H., Panzeri, M., Caponcello, D., Carmelita, A., & Grecucci, A. (2018). Schema therapy for emotional dysregulation in personality disorders: a review. *Current Opinion in Psychiatry*, *31*(1), 43-49. <https://doi.org/10.1097/ycp.0000000000000380>
- Davidson, R. J. (1998). Affective Style and Affective Disorders: Perspectives from Affective Neuroscience. *Cognition and Emotion*, *12*(3), 307-330.  
<https://doi.org/10.1080/026999398379628>
- Davidson, R. J., Sherer, K. R., & Goldsmith, H. H. (2009). *Handbook of affective sciences*. Oxford University Press.
- De Cesarei, A., & Codispoti, M. (2011). Affective modulation of the LPP and  $\alpha$ -ERD during picture viewing. *Psychophysiology*, *48*(10), 1397-1404. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2011.01204.x>
- Dennis, T. A., & Solomon, B. (2010). Frontal EEG and emotion regulation: Electrocortical activity in response to emotional film clips is associated with reduced mood induction and

- attention interference effects. *Biological Psychology*, 85(3), 456-464.  
<https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2010.09.008>
- Dmochowski, J. P., Sajda, P., Dias, J., & Parra, L. C. (2012). Correlated components of ongoing EEG point to emotionally laden attention - a possible marker of engagement? *Front Hum Neurosci*, 6, 112. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00112>
- Dryman, M. T., & Heimberg, R. G. (2018). Emotion regulation in social anxiety and depression: a systematic review of expressive suppression and cognitive reappraisal. *Clinical Psychology Review*, 65, 17-42. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2018.07.004>
- Dubois, J., Oya, H., Tyszka, J., Howard, M., Eberhardt, F., & Adolphs, R. (2017). Causal Mapping of Emotion Networks in the Human Brain: Framework and Initial Findings. *Neuropsychologia*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.11.015>
- Dubois, J., Oya, H., Tyszka, J. M., Howard, M., Eberhardt, F., & Adolphs, R. (2020). Causal mapping of emotion networks in the human brain: Framework and initial findings. *Neuropsychologia*, 145, 106571. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.11.015>
- Eckart, C., Fuentemilla, L., Bauch, E. M., & Bunzeck, N. (2014). Dopaminergic stimulation facilitates working memory and differentially affects prefrontal low theta oscillations. *NeuroImage*, 94, 185-192. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.03.011>
- Eftekhari, A., Zoellner, L. A., & Vigil, S. A. (2009). Patterns of emotion regulation and psychopathology. *Anxiety Stress Coping*, 22(5), 571-586.  
<https://doi.org/10.1080/10615800802179860>
- Ehring, T., & Quack, D. (2010). Emotion regulation difficulties in trauma survivors: the role of trauma type and PTSD symptom severity. *Behav Ther*, 41(4), 587-598.  
<https://doi.org/10.1016/j.beth.2010.04.004>
- Eippert, F., Veit, R., Weiskopf, N., Erb, M., Birbaumer, N., & Anders, S. (2007). Regulation of emotional responses elicited by threat-related stimuli. *Human Brain Mapping*, 28(5), 409-423. <https://doi.org/10.1002/hbm.20291>

- Ertl, M., Hildebrandt, M., Ourina, K., Leicht, G., & Mulert, C. (2013). Emotion regulation by cognitive reappraisal — The role of frontal theta oscillations. *NeuroImage*, *81*, 412-421. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.044>
- Fellinger, R., Klimesch, W., Schnakers, C., Perrin, F., Freunberger, R., Gruber, W., Laureys, S., & Schabus, M. (2011). Cognitive processes in disorders of consciousness as revealed by EEG time–frequency analyses. *Clinical Neurophysiology*, *122*(11), 2177-2184. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2011.03.004>
- Foxe, J. J., & Snyder, A. C. (2011). The Role of Alpha-Band Brain Oscillations as a Sensory Suppression Mechanism during Selective Attention. *Front Psychol*, *2*, 154. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00154>
- Frackowiak, R. S. (2004). *Human brain function*. Elsevier.
- Frank, D. W., Dewitt, M., Hudgens-Haney, M., Schaeffer, D. J., Ball, B. H., Schwarz, N. F., Hussein, A. A., Smart, L. M., & Sabatinelli, D. (2014). Emotion regulation: Quantitative meta-analysis of functional activation and deactivation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *45*, 202-211. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.06.010>
- Freud, A. (1946). *The ego and the mechanisms of defence*. International Universities Press.
- Frijda, N. H. (2017). The Laws of Emotion. <https://doi.org/10.4324/9781315086071>
- Friston, K. J., Holmes, A. P., Worsley, K. J., Poline, J. P., Frith, C. D., & Frackowiak, R. S. J. (1994). Statistical parametric maps in functional imaging: A general linear approach. *Human Brain Mapping*, *2*(4), 189-210. <https://doi.org/10.1002/hbm.460020402>
- Fuchs, M., Kastner, J., Wagner, M., Hawes, S., & Ebersole, J. S. (2002). A standardized boundary element method volume conductor model. *Clinical Neurophysiology*, *113*(5), 702-712. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(02\)00030-5](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(02)00030-5)
- Goldenberg, A., Halperin, E., van Zomeren, M., & Gross, J. J. (2016). The process model of group-based emotion: Integrating intergroup emotion and emotion regulation

perspectives. *Personality and Social Psychology Review*, 20(2), 118-141.

<https://doi.org/10.1177/1088868315581263>

Goodman, R. N., Rietschel, J. C., Lo, L.-C., Costanzo, M. E., & Hatfield, B. D. (2013). Stress, emotion regulation and cognitive performance: The predictive contributions of trait and state relative frontal EEG alpha asymmetry. *International Journal of Psychophysiology*, 87(2), 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.09.008>

Gratton, G., Coles, M. G. H., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 55(4), 468-484.

[https://doi.org/10.1016/0013-4694\(83\)90135-9](https://doi.org/10.1016/0013-4694(83)90135-9)

Grecucci, A., Frederickson, J., & Job, R. (2017). Editorial: Advances in Emotion Regulation: From Neuroscience to Psychotherapy [Editorial]. *Frontiers in Psychology*, 8.

<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00985>

Grecucci, A., Giorgetta, C., Bonini, N., & Sanfey, A. G. (2013). Reappraising social emotions: the role of inferior frontal gyrus, temporo-parietal junction and insula in interpersonal emotion regulation. *Front Hum Neurosci*, 7, 523.

<https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00523>

Grecucci, A., Giorgetta, C., Lorandini, S., Sanfey, A. G., & Bonini, N. (2020). Changing decisions by changing emotions: Behavioral and physiological evidence of two emotion regulation strategies. *Journal of Neuroscience, Psychology, and Economics*, 13(3), 178-189.

<https://doi.org/10.1037/npe0000130>

Grecucci, A., Messina, I., Amodeo, L., Lapomarda, G., Crescentini, C., Dadomo, H., Panzeri, M., Theuninck, A., & Frederickson, J. (2020). A Dual Route Model for Regulating Emotions: Comparing Models, Techniques and Biological Mechanisms [Hypothesis and Theory]. *Frontiers in Psychology*, 11.

<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00930>

Gross, J. J. (1998). The Emerging Field of Emotion Regulation: An Integrative Review. *Review of General Psychology*, 2(3), 271-299. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.2.3.271>

- Gross, J. J. (2015). The Extended Process Model of Emotion Regulation: Elaborations, Applications, and Future Directions. *Psychological Inquiry*, 26(1), 130-137. <https://doi.org/10.1080/1047840x.2015.989751>
- Gross, J. J., & Jazaieri, H. (2014). Emotion, Emotion Regulation, and Psychopathology. *Clinical Psychological Science*, 2(4), 387-401. <https://doi.org/10.1177/2167702614536164>
- Gross, J. J., & Muñoz, R. F. (1995). Emotion regulation and mental health. *Clinical Psychology: Science and Practice*, 2(2), 151-164. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2850.1995.tb00036.x>
- Gross, J. J., & Thompson, R. A. (2007). Emotion Regulation: Conceptual Foundations. In *Handbook of emotion regulation*. (pp. 3-24). The Guilford Press.
- Haalman, I., & Vaadia, E. (1997). Dynamics of neuronal interactions: Relation to behavior, firing rates, and distance between neurons. *Human Brain Mapping*, 5(4), 249-253. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0193\(1997\)5:4<249::AID-HBM8>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0193(1997)5:4<249::AID-HBM8>3.0.CO;2-3)
- Hajcak, G., Macnamara, A., & Olvet, D. M. (2010). Event-Related Potentials, Emotion, and Emotion Regulation: An Integrative Review. *Developmental Neuropsychology*, 35(2), 129-155. <https://doi.org/10.1080/87565640903526504>
- Hari, R. (1997). Human cortical oscillations: a neuromagnetic view through the skull. *Trends in Neurosciences*, 20(1), 44-49. [https://doi.org/10.1016/s0166-2236\(96\)10065-5](https://doi.org/10.1016/s0166-2236(96)10065-5)
- Harmon-Jones, E., Gable, P. A., & Peterson, C. K. (2010). The role of asymmetric frontal cortical activity in emotion-related phenomena: A review and update. *Biological Psychology*, 84(3), 451-462. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2009.08.010>
- Hayashi, H., Iijima, S., Sugita, Y., Teshima, Y., Tashiro, T., Matsuo, R., Yasoshima, A., Hishikawa, Y., & Ishihara, T. (1987). Appearance of frontal mid-line theta rhythm during sleep and its relation to mental activity. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 66(1), 66-70. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(87\)90139-8](https://doi.org/10.1016/0013-4694(87)90139-8)
- Holmes, C. J., Hoge, R., Collins, L., Woods, R., Toga, A. W., & Evans, A. C. (1998). Enhancement of MR Images Using Registration for Signal Averaging. *Journal of*

*Computer Assisted Tomography*, 22(2), 324-333. <https://doi.org/10.1097/00004728-199803000-00032>

Hong, X., Sun, J., Wang, J., Li, C., & Tong, S. (2020). Attention-related modulation of frontal midline theta oscillations in cingulate cortex during a spatial cueing Go/NoGo task. *International Journal of Psychophysiology*, 148, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2019.11.011>

Ito, M. (2004). 'Nurturing the brain' as an emerging research field involving child neurology. *Brain and Development*, 26(7), 429-433. <https://doi.org/10.1016/j.braindev.2003.02.001>

Izard, C. E. (1990). Facial expressions and the regulation of emotions. *Journal of Personality and Social Psychology*, 58(3), 487-498. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.58.3.487>

Jackson, D. C., Malmstadt, J. R., Larson, C. L., & Davidson, R. J. (2000). Suppression and enhancement of emotional responses to unpleasant pictures. *Psychophysiology*, 37(4), 515-522. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.3740515>

Jackson, D. C., Mueller, C. J., Dolski, I., Dalton, K. M., Nitschke, J. B., Urry, H. L., Rosenkranz, M. A., Ryff, C. D., Singer, B. H., & Davidson, R. J. (2003). Now You Feel It, Now You Don't. *Psychological Science*, 14(6), 612-617. [https://doi.org/10.1046/j.0956-7976.2003.psci\\_1473.x](https://doi.org/10.1046/j.0956-7976.2003.psci_1473.x)

Jacobs, G. D., & Friedman, R. (2004). EEG Spectral Analysis of Relaxation Techniques. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 29(4), 245-254. <https://doi.org/10.1007/s10484-004-0385-2>

Jaspers-Fayer, F., Ertl, M., Leicht, G., Leupelt, A., & Mulert, C. (2012). Single-trial EEG-fMRI coupling of the emotional auditory early posterior negativity. *NeuroImage*, 62(3), 1807-1814. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.05.018>

Jensen, O. (2005). Reading the hippocampal code by theta phase-locking. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(12), 551-553. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.10.003>

- Jermann, F., Van der Linden, M., d'Acremont, M., & Zermatten, A. (2006). Cognitive Emotion Regulation Questionnaire (CERQ): Confirmatory factor analysis and psychometric properties of the French translation. *European Journal of Psychological Assessment*, 22(2), 126-131. <https://doi.org/10.1027/1015-5759.22.2.126>
- Jurcak, V., Tsuzuki, D., & Dan, I. (2007). 10/20, 10/10, and 10/5 systems revisited: Their validity as relative head-surface-based positioning systems. *NeuroImage*, 34(4), 1600-1611. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.09.024>
- Kalisch, R. (2009). The functional neuroanatomy of reappraisal: Time matters. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33(8), 1215-1226. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.06.003>
- Kanda, P. A. D. M., Anghinah, R., Smidh, M. T., & Silva, J. M. (2009). The clinical use of quantitative EEG in cognitive disorders. *Dementia & Neuropsychologia*, 3(3), 195-203. <https://doi.org/10.1590/s1980-57642009dn30300004>
- Kang, J.-H., Jeong, J. W., Kim, H. T., Kim, S. H., & Kim, S.-P. (2014). Representation of Cognitive Reappraisal Goals in Frontal Gamma Oscillations. *PLoS ONE*, 9(11), e113375. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113375>
- Keil, A., Müller, M. M., Gruber, T., Wienbruch, C., Stolarova, M., & Elbert, T. (2001). Effects of emotional arousal in the cerebral hemispheres: a study of oscillatory brain activity and event-related potentials. *Clinical Neurophysiology*, 112(11), 2057-2068. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(01\)00654-x](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(01)00654-x)
- Kilavik, B. E., Zaepffel, M., Brovelli, A., Mackay, W. A., & Riehle, A. (2013). The ups and downs of beta oscillations in sensorimotor cortex. *Experimental Neurology*, 245, 15-26. <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2012.09.014>
- Kirk, I. J., & Mackay, J. C. (2003). The Role of Theta-Range Oscillations in Synchronising and Integrating Activity in Distributed Mnemonic Networks. *Cortex*, 39(4), 993-1008. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70874-8](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70874-8)

- Kitaura, Y., Nishida, K., Yoshimura, M., Mii, H., Katsura, K., Ueda, S., Ikeda, S., Pascual-Marqui, R. D., Ishii, R., & Kinoshita, T. (2017). Functional localization and effective connectivity of cortical theta and alpha oscillatory activity during an attention task. *Clinical Neurophysiology Practice*, 2, 193-200. <https://doi.org/10.1016/j.cnp.2017.09.002>
- Klimesch, W. (2012). Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(12), 606-617. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.10.007>
- Knyazev, G. G. (2007). Motivation, emotion, and their inhibitory control mirrored in brain oscillations. *Neurosci Biobehav Rev*, 31(3), 377-395. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.10.004>
- Knyazev, G. G. (2007). Motivation, emotion, and their inhibitory control mirrored in brain oscillations. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 31(3), 377-395. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.10.004>
- Knyazev, G. G. (2012). EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 36(1), 677-695. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.10.002>
- Knyazev, G. G., Slobodskoj-Plusnin, J. Y., & Bocharov, A. V. (2009). Event-related delta and theta synchronization during explicit and implicit emotion processing. *Neuroscience*, 164(4), 1588-1600. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2009.09.057>
- Kohn, N., Eickhoff, S. B., Scheller, M., Laird, A. R., Fox, P. T., & Habel, U. (2014). Neural network of cognitive emotion regulation — An ALE meta-analysis and MACM analysis. *NeuroImage*, 87, 345-355. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.11.001>
- Koole, S. L. (2009). The psychology of emotion regulation: An integrative review. *Cognition & Emotion*, 23(1), 4-41. <https://doi.org/10.1080/02699930802619031>
- Koole, S. L., Webb, T. L., & Sheeran, P. L. (2015). Implicit emotion regulation: feeling better without knowing why. *Current Opinion in Psychology*, 3, 6-10. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2014.12.027>

- Korotkova, T., Ponomarenko, A., Monaghan, C. K., Poulter, S. L., Cacucci, F., Wills, T., Hasselmo, M. E., & Lever, C. (2018). Reconciling the different faces of hippocampal theta: The role of theta oscillations in cognitive, emotional and innate behaviors. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *85*, 65-80.  
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.09.004>
- Kotsou, I., Nelis, D., Grégoire, J., & Mikolajczak, M. (2011). Emotional plasticity: conditions and effects of improving emotional competence in adulthood. *J Appl Psychol*, *96*(4), 827-839. <https://doi.org/10.1037/a0023047>
- Kroenke, K., Spitzer, R. L., & Williams, J. B. W. (2001). The PHQ-9. *Journal of General Internal Medicine*, *16*(9), 606-613. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1497.2001.016009606.x>
- Lancaster, J. L., Woldorff, M. G., Parsons, L. M., Liotti, M., Freitas, C. S., Rainey, L., Kochunov, P. V., Nickerson, D., Mikiten, S. A., & Fox, P. T. (2000). Automated Talairach Atlas labels for functional brain mapping. *Human Brain Mapping*, *10*(3), 120-131. [https://doi.org/10.1002/1097-0193\(200007\)10:3<120::AID-HBM30>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/1097-0193(200007)10:3<120::AID-HBM30>3.0.CO;2-8)
- Lang, M., Lang, W., Diekmann, V., & Kornhuber, H. (1987). The frontal theta rhythm indicating motor and cognitive learning. *Electroencephalography and clinical neurophysiology. Supplement*, *40*, 322-327.
- Lang, P., & Bradley, M. M. (2007). The International Affective Picture System (IAPS) in the study of emotion and attention. *Handbook of emotion elicitation and assessment*, *29*, 70-73.
- Lang, P. J., Bradley, M. M., & Cuthbert, B. N. (1997). International affective picture system (IAPS): Technical manual and affective ratings. *NIMH Center for the Study of Emotion and Attention*, *1*(39-58), 3.
- Langens, T. A., & Mörth, S. (2003). Repressive coping and the use of passive and active coping strategies. *Personality and Individual Differences*, *35*(2), 461-473.  
[https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(02\)00207-6](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(02)00207-6)

- Lapomarda, G., Valer, S., Job, R., & Grecucci, A. (2022). Built to last: Theta and delta changes in resting-state EEG activity after regulating emotions. *Brain and Behavior*.  
<https://doi.org/10.1002/brb3.2597>
- Lavoie ME, S. G., Morand-Beaulieu S, Luck D, Stip E, Marin MF, Lupien SJ. (2016). Chapitre 8: Psychophysiology et Neuropsychologie. In. P. Lalonde., M. Pinard. (Eds.). *Psychiatrie Clinique: une approche bio-psycho-sociale 4e Édition. Tome I: Introduction à la psychiatrie, déterminants bio-psycho-sociaux, syndromes cliniques et organisation des soins*. Chenelière Éducation, Montréal, pp. 158-193  
<https://doi.org/> ISBN 978-2-7650-4770-4
- Lazarus, R. S., & Alfert, E. (1964). Short-circuiting of threat by experimentally altering cognitive appraisal. *The Journal of Abnormal and Social Psychology*, 69(2), 195-205.  
<https://doi.org/10.1037/h0044635>
- Lazarus, R. S., & Folkman, S. (1984). *Stress, appraisal, and coping*. Springer publishing company.
- Lesting, J., Narayanan, R. T., Kluge, C., Sangha, S., Seidenbecher, T., & Pape, H.-C. (2011). Patterns of Coupled Theta Activity in Amygdala-Hippocampal-Prefrontal Cortical Circuits during Fear Extinction. *PLoS ONE*, 6(6), e21714.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021714>
- Levy, K. N., Meehan, K. B., Kelly, K. M., Reynoso, J. S., Weber, M., Clarkin, J. F., & Kernberg, O. F. (2006). Change in attachment patterns and reflective function in a randomized control trial of transference-focused psychotherapy for borderline personality disorder. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 74(6), 1027-1040.  
<https://doi.org/10.1037/0022-006x.74.6.1027>
- Li, W., Li, Y., & Cao, D. (2021). The effectiveness of emotion cognitive reappraisal as measured by self-reported response and its link to EEG alpha asymmetry. *Behavioural Brain Research*, 400, 113042. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2020.113042>

- Limoges, E., Mottron, L., Bolduc, C., Berthiaume, C., & Godbout, R. (2005). Atypical sleep architecture and the autism phenotype. *Brain*, *128*(Pt 5), 1049-1061. <https://doi.org/10.1093/brain/awh425>
- Marshall, L., Helgadóttir, H., Mölle, M., & Born, J. (2006). Boosting slow oscillations during sleep potentiates memory. *Nature*, *444*(7119), 610-613. <https://doi.org/10.1038/nature05278>
- Marteau, T. M., & Bekker, H. (1992). The development of a six-item short-form of the state scale of the Spielberger State—Trait Anxiety Inventory (STAI). *British Journal of Clinical Psychology*, *31*(3), 301-306. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8260.1992.tb00997.x>
- Martin, R. C., & Dahlen, E. R. (2005). Cognitive emotion regulation in the prediction of depression, anxiety, stress, and anger. *Personality and Individual Differences*, *39*(7), 1249-1260. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2005.06.004>
- Mathôt, S., Schreij, D., & Theeuwes, J. (2012). OpenSesame: An open-source, graphical experiment builder for the social sciences. *Behavior Research Methods*, *44*(2), 314-324. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0168-7>
- Mauss, I. B., & Robinson, M. D. (2009). Measures of emotion: A review. *Cognition & Emotion*, *23*(2), 209-237. <https://doi.org/10.1080/02699930802204677>
- Mazziotta, J., Toga, A., Evans, A., Fox, P., Lancaster, J., Zilles, K., Woods, R., Paus, T., Simpson, G., Pike, B., Holmes, C., Collins, L., Thompson, P., MacDonald, D., Iacoboni, M., Schormann, T., Amunts, K., Palomero-Gallagher, N., Geyer, S., Parsons, L., Narr, K., Kabani, N., Le Goualher, G., Boomsma, D., Cannon, T., Kawashima, R., & Mazoyer, B. (2001). A probabilistic atlas and reference system for the human brain: International Consortium for Brain Mapping (ICBM). *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, *356*(1412), 1293-1322. <https://doi.org/10.1098/rstb.2001.0915>
- McRae, K., Ciesielski, B., & Gross, J. J. (2012). Unpacking cognitive reappraisal: Goals, tactics, and outcomes. *Emotion*, *12*(2), 250-255. <https://doi.org/10.1037/a0026351>

- McRae, K., & Gross, J. J. (2020). Emotion regulation. *Emotion*, 20(1), 1-9.  
<https://doi.org/10.1037/emo0000703>
- McRae, K., Ochsner, K. N., Mauss, I. B., Gabrieli, J. J. D., & Gross, J. J. (2008). Gender Differences in Emotion Regulation: An fMRI Study of Cognitive Reappraisal. *Group Processes & Intergroup Relations*, 11(2), 143-162.  
<https://doi.org/10.1177/1368430207088035>
- Mennin, D. S., & Fresco, D. M. (2014). Emotion regulation therapy. In *Handbook of emotion regulation*, 2nd ed. (pp. 469-490). The Guilford Press.
- Miller, G., Crocker, L., Spielberg, J., Infantolino, Z., & Heller, W. (2013). Issues in localization of brain function: The case of lateralized frontal cortex in cognition, emotion, and psychopathology [Review]. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7.  
<https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00002>
- Miller, R. (2013). *Cortico-hippocampal interplay and the representation of contexts in the brain* (Vol. 17). Springer Science & Business Media.
- Mischel, W., Shoda, Y., & Rodriguez, M. L. (1989). Delay of Gratification in Children. *Science*, 244(4907), 933-938. <https://doi.org/10.1126/science.2658056>
- Moore, A., Gorodnitsky, I., & Pineda, J. (2012). EEG mu component responses to viewing emotional faces. *Behav Brain Res*, 226(1), 309-316.  
<https://doi.org/10.1016/j.bbr.2011.07.048>
- Moser, J. S., Most, S. B., & Simons, R. F. (2010). Increasing negative emotions by reappraisal enhances subsequent cognitive control: A combined behavioral and electrophysiological study. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 10(2), 195-207.  
<https://doi.org/10.3758/cabn.10.2.195>
- Mulert, C., Juckel, G., Brunmeier, M., Karch, S., Leicht, G., Mergl, R., Möller, H.-J., Hegerl, U., & Pogarell, O. (2007). Rostral Anterior Cingulate Cortex Activity in the Theta Band Predicts Response to Antidepressive Medication. *Clinical EEG and Neuroscience*, 38(2), 78-81. <https://doi.org/10.1177/155005940703800209>

- Müller, M. M., Keil, A., Gruber, T., & Elbert, T. (1999). Processing of affective pictures modulates right-hemispheric gamma band EEG activity. *Clinical Neurophysiology*, *110*(11), 1913-1920. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(99\)00151-0](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(99)00151-0)
- Murray, S. L. (2005). Regulating the Risks of Closeness. *Current Directions in Psychological Science*, *14*(2), 74-78. <https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2005.00338.x>
- Myruski, S., Bagrodia, R., & Dennis-Tiway, T. (2022). Delta-beta correlation predicts adaptive child emotion regulation concurrently and two years later. *Biological Psychology*, *167*, 108225. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2021.108225>
- Narayanan, V., Heiming, R. S., Jansen, F., Lesting, J., Sachser, N., Pape, H.-C., & Seidenbecher, T. (2011). Social Defeat: Impact on Fear Extinction and Amygdala-Prefrontal Cortical Theta Synchrony in 5-HTT Deficient Mice. *PLoS ONE*, *6*(7), e22600. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022600>
- Neacsiu, A. D., Bohus, M., & Linehan, M. M. (2014). Dialectical behavior therapy: An intervention for emotion dysregulation. In *Handbook of emotion regulation*, 2nd ed. (pp. 491-507). The Guilford Press.
- Nezlek, J. B., & Kuppens, P. (2008). Regulating Positive and Negative Emotions in Daily Life. *Journal of Personality*, *76*(3), 561-580. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6494.2008.00496.x>
- Nguyen, T., Zhou, T., Potter, T., Zou, L., & Zhang, Y. (2019). The Cortical Network of Emotion Regulation: Insights From Advanced EEG-fMRI Integration Analysis. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, *38*(10), 2423-2433. <https://doi.org/10.1109/tmi.2019.2900978>
- Nichols, T. E., & Holmes, A. P. (2002). Nonparametric permutation tests for functional neuroimaging: a primer with examples. *Hum Brain Mapp*, *15*(1), 1-25. <https://doi.org/10.1002/hbm.1058>
- Nishitani, N. (2003). Dynamics of cognitive processing in the human hippocampus by neuromagnetic and neurochemical assessments. *NeuroImage*, *20*(1), 561-571. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00280-5](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00280-5)

- Nolen-Hoeksema, S. (2012). Emotion Regulation and Psychopathology: The Role of Gender. *Annual Review of Clinical Psychology*, 8(1), 161-187. <https://doi.org/10.1146/annurev-clinpsy-032511-143109>
- Nozaki, Y., & Mikolajczak, M. (2020). Extrinsic emotion regulation. *Emotion*, 20(1), 10-15. <https://doi.org/10.1037/emo0000636>
- Nuwer, M. (1997). Assessment of digital EEG, quantitative EEG, and EEG brain mapping: Report of the American Academy of Neurology and the American Clinical Neurophysiology Society\* [RETIRED]. *Neurology*, 49(1), 277-292. <https://doi.org/10.1212/wnl.49.1.277>
- O'Driscoll, C., Laing, J., & Mason, O. (2014). Cognitive emotion regulation strategies, alexithymia and dissociation in schizophrenia, a review and meta-analysis. *Clinical Psychology Review*, 34(6), 482-495. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2014.07.002>
- Oakes, T. R., Pizzagalli, D. A., Hendrick, A. M., Horras, K. A., Larson, C. L., Abercrombie, H. C., Schaefer, S. M., Koger, J. V., & Davidson, R. J. (2004). Functional coupling of simultaneous electrical and metabolic activity in the human brain. *Human Brain Mapping*, 21(4), 257-270. <https://doi.org/10.1002/hbm.20004>
- Ochsner, K. N., Bunge, S., Gross, J., & Gabrieli, J. (2002a). Rethinking Feelings: An fMRI Study of the Cognitive Regulation of Emotion. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 1215-1229. <https://doi.org/10.1162/089892902760807212>
- Ochsner, K. N., Bunge, S. A., Gross, J. J., & Gabrieli, J. D. E. (2002b). Rethinking Feelings: An fMRI Study of the Cognitive Regulation of Emotion. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(8), 1215-1229. <https://doi.org/10.1162/089892902760807212>
- Ochsner, K. N., & Gross, J. J. (2005). The cognitive control of emotion. *Trends Cogn Sci*, 9(5), 242-249. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.03.010>
- Ochsner, K. N., & Gross, J. J. (2007). The neural architecture of emotion regulation. In *Handbook of emotion regulation* (Vol. 1, pp. 87-109).

- Ochsner, K. N., Ray, R. D., Cooper, J. C., Robertson, E. R., Chopra, S., Gabrieli, J. D. E., & Gross, J. J. (2004). For better or for worse: neural systems supporting the cognitive down- and up-regulation of negative emotion. *NeuroImage*, 23(2), 483-499.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.06.030>
- Ochsner, K. N., Silvers, J. A., & Buhle, J. T. (2012). Functional imaging studies of emotion regulation: a synthetic review and evolving model of the cognitive control of emotion. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1251(1), E1-E24.  
<https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2012.06751.x>
- Oostenveld, R., & Praamstra, P. (2001). The five percent electrode system for high-resolution EEG and ERP measurements. *Clinical Neurophysiology*, 112(4), 713-719.  
[https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(00\)00527-7](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(00)00527-7)
- Papousek, I., Weiss, E. M., Perchtold, C. M., Weber, H., De Assunção, V. L., Schuler, G., Lackner, H. K., & Fink, A. (2017). The capacity for generating cognitive reappraisals is reflected in asymmetric activation of frontal brain regions. *Brain Imaging and Behavior*, 11(2), 577-590. <https://doi.org/10.1007/s11682-016-9537-2>
- Paré, D. (2003). Role of the basolateral amygdala in memory consolidation. *Progress in Neurobiology*, 70(5), 409-420. [https://doi.org/10.1016/S0301-0082\(03\)00104-7](https://doi.org/10.1016/S0301-0082(03)00104-7)
- Parvaz, M. A., Macnamara, A., Goldstein, R. Z., & Hajcak, G. (2012). Event-related induced frontal alpha as a marker of lateral prefrontal cortex activation during cognitive reappraisal. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 12(4), 730-740.  
<https://doi.org/10.3758/s13415-012-0107-9>
- Pascual-Marqui, R. D., Esslen, M., Kochi, K., & Lehmann, D. (2002). Functional imaging with low-resolution brain electromagnetic tomography (LORETA): a review. *Methods Find Exp Clin Pharmacol*, 24 Suppl C, 91-95.
- Pascual-Marqui, R. D., Lehmann, D., Koenig, T., Kochi, K., Merlo, M. C., Hell, D., & Koukkou, M. (1999). Low resolution brain electromagnetic tomography (LORETA) functional

- imaging in acute, neuroleptic-naive, first-episode, productive schizophrenia. *Psychiatry Res*, 90(3), 169-179. [https://doi.org/10.1016/s0925-4927\(99\)00013-x](https://doi.org/10.1016/s0925-4927(99)00013-x)
- Pascual-Marqui, R. D., Michel, C. M., & Lehmann, D. (1994). Low resolution electromagnetic tomography: a new method for localizing electrical activity in the brain. *International Journal of Psychophysiology*, 18(1), 49-65. [https://doi.org/10.1016/0167-8760\(84\)90014-X](https://doi.org/10.1016/0167-8760(84)90014-X)
- Pfurtscheller, G., & Lopes da Silva, F. H. (1999). Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles. *Clinical Neurophysiology*, 110(11), 1842-1857. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(99\)00141-8](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(99)00141-8)
- Phillips, M. L., Drevets, W. C., Rauch, S. L., & Lane, R. (2003). Neurobiology of emotion perception I: The neural basis of normal emotion perception. *Biological Psychiatry*, 54(5), 504-514. [https://doi.org/10.1016/s0006-3223\(03\)00168-9](https://doi.org/10.1016/s0006-3223(03)00168-9)
- Pizzagalli, D. A., Oakes, T. R., & Davidson, R. J. (2003). Coupling of theta activity and glucose metabolism in the human rostral anterior cingulate cortex: An EEG/PET study of normal and depressed subjects. *Psychophysiology*, 40(6), 939-949. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.00112>
- Popa, D., Duvarci, S., Popescu, A. T., Léna, C., & Paré, D. (2010). Coherent amygdalocortical theta promotes fear memory consolidation during paradoxical sleep. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(14), 6516-6519. <https://doi.org/10.1073/pnas.0913016107>
- Popov, T., Steffen, A., Weisz, N., Miller, G. A., & Rockstroh, B. (2012). Cross-frequency dynamics of neuromagnetic oscillatory activity: Two mechanisms of emotion regulation. *Psychophysiology*, 49(12), 1545-1557. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2012.01484.x>
- Porat, R., Tamir, M., & Halperin, E. (2020). Group-based emotion regulation: A motivated approach. *Emotion*, 20(1), 16-20. <https://doi.org/10.1037/emo0000639>

- Ray, R. D., McRae, K., Ochsner, K. N., & Gross, J. J. (2010). Cognitive reappraisal of negative affect: Converging evidence from EMG and self-report. *Emotion, 10*(4), 587-592. <https://doi.org/10.1037/a0019015>
- Ray, S., & Maunsell, J. H. R. (2015). Do gamma oscillations play a role in cerebral cortex? *Trends in Cognitive Sciences, 19*(2), 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.12.002>
- Romeo, Z., Fusina, F., Semenzato, L., Bonato, M., Angrilli, A., & Spironelli, C. (2022). Comparison of Slides and Video Clips as Different Methods for Inducing Emotions: An Electroencephalographic Alpha Modulation Study. *Front Hum Neurosci, 16*, 901422. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.901422>
- Sadato, N., Nakamura, S., Oohashi, T., Nishina, E., Fuwamoto, Y., Waki, A., & Yonekura, Y. (1998). Neural networks for generation and suppression of alpha rhythm: a PET study. *NeuroReport, 9*(5), 893-897. <https://doi.org/10.1097/00001756-199803300-00024>
- Salari, N., Büchel, C., & Rose, M. (2012). Functional Dissociation of Ongoing Oscillatory Brain States. *PLoS ONE, 7*(5), e38090. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038090>
- Salinas, E., & Sejnowski, T. J. (2001). Correlated neuronal activity and the flow of neural information. *Nature Reviews Neuroscience, 2*(8), 539-550. <https://doi.org/10.1038/35086012>
- Salisbury, D. F., & Taylor, G. (2012). Semantic priming increases left hemisphere theta power and intertrial phase synchrony. *Psychophysiology, 49*(3), 305-311. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2011.01318.x>
- Sanei, S., & Chambers, J. A. (2013). *EEG signal processing*. John Wiley & Sons.
- Sapolsky, R. M. (2007). Stress, Stress-Related Disease, and Emotional Regulation. In *Handbook of emotion regulation*. (pp. 606-615). The Guilford Press.
- Saul, L. J., & David, H. (1932). ACTION CURRENTS IN THE CENTRAL NERVOUS SYSTEM: I. ACTION CURRENTS OF THE AUDITORY TRACTS. *Archives of*

*Neurology & Psychiatry*, 28(5), 1104-1116.

<https://doi.org/10.1001/archneurpsyc.1932.02240050140009>

Sauseng, P., Hoppe, J., Klimesch, W., Gerloff, C., & Hummel, F. C. (2007). Dissociation of sustained attention from central executive functions: local activity and interregional connectivity in the theta range. *European Journal of Neuroscience*, 25(2), 587-593.

<https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2006.05286.x>

Sauseng, P., Klimesch, W., Freunberger, R., Pecherstorfer, T., Hanslmayr, S., & Doppelmayr, M. (2006). Relevance of EEG alpha and theta oscillations during task switching.

*Experimental Brain Research*, 170(3), 295-301. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0211-y>

Schmidts, C., Foerster, A., & Kunde, W. (2020). Situation selection and cognitive conflict: explicit knowledge is necessary for conflict avoidance. *Cognition and Emotion*, 34(6), 1199-1209.

<https://doi.org/10.1080/02699931.2020.1736006>

Schulze, L., Domes, G., Krüger, A., Berger, C., Fleischer, M., Prehn, K., Schmahl, C., Grossmann, A., Hauenstein, K., & Herpertz, S. C. (2011). Neuronal Correlates of Cognitive Reappraisal in Borderline Patients with Affective Instability. *Biological Psychiatry*, 69(6), 564-573. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2010.10.025>

Seeley, S. H., Garcia, E., & Mennin, D. S. (2015). Recent advances in laboratory assessment of emotion regulation. *Current Opinion in Psychology*, 3, 58-63.

<https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2015.02.009>

Sheppes, G., Suri, G., & Gross, J. J. (2015). Emotion Regulation and Psychopathology. *Annual Review of Clinical Psychology*, 11(1), 379-405. <https://doi.org/10.1146/annurev-clinpsy-032814-112739>

Siapas, A. G., Lubenov, E. V., & Wilson, M. A. (2005). Prefrontal Phase Locking to Hippocampal Theta Oscillations. *Neuron*, 46(1), 141-151.

<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2005.02.028>

- Silva, L. R., Amitai, Y., & Connors, B. W. (1991). Intrinsic Oscillations of Neocortex Generated by Layer 5 Pyramidal Neurons. *Science*, *251*(4992), 432-435.  
<https://doi.org/10.1126/science.1824881>
- Sommer, I. E. C., Diederer, K. M. J., Blom, J.-D., Willems, A., Kushan, L., Slotema, K., Boks, M. P. M., Daalman, K., Hoek, H. W., Neggers, S. F. W., & Kahn, R. S. (2008). Auditory verbal hallucinations predominantly activate the right inferior frontal area. *Brain*, *131*(12), 3169-3177. <https://doi.org/10.1093/brain/awn251>
- Stein, T., Seymour, K., Hebart, M. N., & Sterzer, P. (2014). Rapid Fear Detection Relies on High Spatial Frequencies. *Psychological Science*, *25*(2), 566-574.  
<https://doi.org/10.1177/0956797613512509>
- Steriade, M., Nunez, A., & Amzica, F. (1993). A novel slow (< 1 Hz) oscillation of neocortical neurons in vivo: depolarizing and hyperpolarizing components. *The Journal of Neuroscience*, *13*(8), 3252-3265. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.13-08-03252.1993>
- Sulpizio, S., Grecucci, A., & Job, R. (2021). Tune in to the right frequency: Theta changes when distancing from emotions elicited by unpleasant images and words. *Eur J Neurosci*, *53*(3), 916-928. <https://doi.org/10.1111/ejn.15013>
- Thatcher, R. W., North, D., & Biver, C. (2005). Evaluation and Validity of a LORETA Normative EEG Database. *Clinical EEG and Neuroscience*, *36*(2), 116-122.  
<https://doi.org/10.1177/155005940503600211>
- Thiruchselvam, R., Blechert, J., Sheppes, G., Rydstrom, A., & Gross, J. J. (2011). The temporal dynamics of emotion regulation: An EEG study of distraction and reappraisal. *Biological Psychology*, *87*(1), 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2011.02.009>
- Thompson, R. A. (1994). Emotion regulation: A theme in search of definition. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, *59*(2-3), 25-52, 250-283.  
<https://doi.org/10.2307/1166137>

- Tolegenova, A. A., Kustubayeva, A. M., & Matthews, G. (2014). Trait Meta-Mood, gender and EEG response during emotion-regulation. *Personality and Individual Differences*, *65*, 75-80. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2014.01.028>
- Tortella-Feliu, M., Morillas-Romero, A., Balle, M., Llabrés, J., Bornas, X., & Putman, P. (2014). Spontaneous EEG activity and spontaneous emotion regulation. *International Journal of Psychophysiology*, *94*(3), 365-372. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.09.003>
- Underwood, R., Tolmeijer, E., Wibroe, J., Peters, E., & Mason, L. (2021). Networks underpinning emotion: A systematic review and synthesis of functional and effective connectivity. *NeuroImage*, *243*, 118486. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118486>
- Urry, H. L. (2009). Using reappraisal to regulate unpleasant emotional episodes: Goals and timing matter. *Emotion*, *9*(6), 782-797. <https://doi.org/10.1037/a0017109>
- Uusberg, A., Thiruchselvam, R., & Gross, J. J. (2014). Using distraction to regulate emotion: Insights from EEG theta dynamics. *International Journal of Psychophysiology*, *91*(3), 254-260. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.01.006>
- Uusberg, A., Uibo, H., Kreegipuu, K., & Allik, J. (2013). EEG alpha and cortical inhibition in affective attention. *International Journal of Psychophysiology*, *89*(1), 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.04.020>
- Van Bockstaele, B., Atticciati, L., Hiekkaranta, A. P., Larsen, H., & Verschuere, B. (2020). Choose change: Situation modification, distraction, and reappraisal in mild versus intense negative situations. *Motivation and Emotion*, *44*(4), 583-596. <https://doi.org/10.1007/s11031-019-09811-8>
- van der Meer, L., Wout, M. v. t., & Aleman, A. (2009). Emotion regulation strategies in patients with schizophrenia. *Psychiatry Research*, *170*(2), 108-113. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2009.07.010>
- Vuilleumier, P., & Driver, J. (2007). Modulation of visual processing by attention and emotion: windows on causal interactions between human brain regions. *Philosophical Transactions*

*of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362(1481), 837-855.

<https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2092>

Wagner, M., Fuchs, M., & Kastner, J. (2003). Evaluation of sLORETA in the Presence of Noise and Multiple Sources. *Brain Topography*, 16(4), 277-280.

<https://doi.org/10.1023/b:brat.0000032865.58382.62>

Wang, F., Wang, C., Yin, Q., Wang, K., Li, D., Mao, M., Zhu, C., & Huang, Y. (2015). Reappraisal writing relieves social anxiety and may be accompanied by changes in frontal alpha asymmetry [Original Research]. *Frontiers in Psychology*, 6.

<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01604>

Webb, T. L., Lindquist, K. A., Jones, K., Avishai, A., & Sheeran, P. (2018). Situation selection is a particularly effective emotion regulation strategy for people who need help regulating their emotions. *Cognition and Emotion*, 32(2), 231-248.

<https://doi.org/10.1080/02699931.2017.1295922>

Webb, T. L., Miles, E., & Sheeran, P. (2012). Dealing with feeling: A meta-analysis of the effectiveness of strategies derived from the process model of emotion regulation.

*Psychological Bulletin*, 138(4), 775-808. <https://doi.org/10.1037/a0027600>

Wegner, D. M., Erber, R., & Zanakos, S. (1993). Ironic processes in the mental control of mood and mood-related thought. *Journal of Personality and Social Psychology*, 65(6), 1093-

1104. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.65.6.1093>

Wei, L., Zhao, M., Yang, X., & Li, Y. (2017). Theta oscillations during cognitive reappraisal of sad and fearful stimuli. *8th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)*.

<https://doi.org/10.1109/NER.2017.8008413>

Whittle, S., Yücel, M., Yap, M. B. H., & Allen, N. B. (2011). Sex differences in the neural correlates of emotion: Evidence from neuroimaging. *Biological Psychology*, 87(3), 319-

333. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2011.05.003>

- Wiemer, J., Rauner, M. M., Stegmann, Y., & Pauli, P. (2021). Reappraising fear: is up-regulation more efficient than down-regulation? *Motivation and Emotion*, *45*(2), 221-234.  
<https://doi.org/10.1007/s11031-021-09871-9>
- Yang, J., Xu, X., Du, X., Shi, C., & Fang, F. (2011). Effects of Unconscious Processing on Implicit Memory for Fearful Faces. *PLoS ONE*, *6*(2), e14641.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014641>
- Zaki, J., & Williams, W. C. (2013). Interpersonal emotion regulation. *Emotion*, *13*(5), 803-810.  
<https://doi.org/10.1037/a0033839>
- Zhang, W., Li, X., Liu, X., Duan, X., Wang, D., & Shen, J. (2013). Distraction reduces theta synchronization in emotion regulation during adolescence. *Neuroscience Letters*, *550*, 81-86. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2013.05.070>
- Zilverstand, A., Parvaz, M. A., & Goldstein, R. Z. (2017). Neuroimaging cognitive reappraisal in clinical populations to define neural targets for enhancing emotion regulation. A systematic review. *NeuroImage*, *151*, 105-116.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.06.009>

## **APPENDICE A**

Questionnaire PHQ-9 (Kroenke et al., 2001)

## QUESTIONNAIRE SUR LA SANTÉ DU PATIENT-9 (PHQ-9)

Au cours des deux dernières semaines, à quelle fréquence avez-vous été dérangé(e) par les problèmes suivants?

(Utilisez un « ✓ » pour indiquer votre réponse)

	Jamais	Plusieurs jours	Plus de sept jours	Presque tous les jours
1. Peu d'intérêt ou de plaisir à faire des choses	0	1	2	3
2. Se sentir triste, déprimé(e) ou désespéré(e)	0	1	2	3
3. Difficultés à s'endormir ou à rester endormi(e), ou trop dormir	0	1	2	3
4. Se sentir fatigué(e) ou avoir peu d'énergie	0	1	2	3
5. Peu d'appétit ou trop manger	0	1	2	3
6. Mauvaise perception de vous-même — ou vous pensez que vous êtes un perdant ou que vous n'avez pas satisfait vos propres attentes ou celles de votre famille	0	1	2	3
7. Difficultés à se concentrer sur des choses telles que lire le journal ou regarder la télévision	0	1	2	3
8. Vous bougez ou parlez si lentement que les autres personnes ont pu le remarquer. Ou au contraire — vous êtes si agité(e) que vous bougez beaucoup plus que d'habitude	0	1	2	3
9. Vous avez pensé que vous seriez mieux mort(e) ou pensé à vous blesser d'une façon ou d'une autre	0	1	2	3

FOR OFFICE CODING   0   +        +        +         
=Total Score:       

Si vous avez coché au moins un des problèmes nommés dans ce questionnaire, répondez à la question suivante : dans quelle mesure ce(s) problème(s) a-t-il (ont-ils) rendu difficile(s) votre travail, vos tâches à la maison ou votre capacité à bien vous entendre avec les autres?

Pas du tout difficile(s)	Plutôt difficile(s)	Très difficile(s)	Extrêmement difficile(s)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Mis au point par les D<sup>rs</sup> Robert L. Spitzer, Janet B. Williams et Kurt Kroenke et collègues, et une bourse d'étude de Pfizer Inc. Aucune permission requise pour reproduire, traduire, afficher or distribuer.

## **APPENDICE B**

Questionnaire STAI-6 (Marteau & Bekker, 1992)

## QUESTIONNAIRE D'ANXIÉTÉ SITUATIONNELLE (forme Y-6 français)

Ci après figurent un certain nombre de déclarations que les gens utilisent souvent pour se décrire. Lisez chacun des énoncés et choisissez le numéro approprié qui convient le mieux à la façon dont vous vous sentez maintenant, juste avant cette situation choisie préalablement. Il n'existe ni bonnes ni mauvaises réponses. Ne passez pas trop de temps sur chacun des points, mais donnez la réponse qui semble décrire le mieux ce que vous ressentez dans cette situation.

		Pas du tout	Un peu	modéré ment	beauc oup
1.	Je me sens calme	1	2	3	4
2.	Je suis tendu(e)	1	2	3	4
3.	Je suis bouleversé(e)	1	2	3	4
4.	Je suis détendu(e)	1	2	3	4
5.	Je me sens satisfait(e)	1	2	3	4
6.	Je suis préoccupé(e)	1	2	3	4
Assurez-vous d'avoir répondu à toutes les questions					
<b>TOTAL SCORE</b>					

Items 1, 3, 6, 15, 16, 17 tirés du STAI-state

Références :

Gauthier, J., Bouchard, S. (1993). Adaptation canadienne-française de la forme révisée du *State-Trait Anxiety Inventory* de Spielberger. *Revue canadienne des sciences du comportement*, 25:4, 559-578.

Marteau, T.M., Bekker, H. (1992). The development of a six-item short form of the state scale of the Spielberger State-Trait Anxiety Inventory (STAI). *British Journal of Clinical Psychology*, 31, 301-306.

## **APPENDICE C**

Questionnaire sur les habitudes de sommeil (Limoges et al., 2005)

Répondez aux questions suivantes en vous basant sur vos habitudes au cours du dernier mois :

1. Combien de minutes s'écoulent avant de vous endormir ?		
2. Pendant combien de minutes êtes-vous réveillé pendant la nuit ?		
3. A quelle heure vous couchez-vous...		
les soirs de semaine ?		
les soirs de fin de semaine ?		
4. A quelle heure vous levez-vous...		
les soirs de semaine ?		
les soirs de fin de semaine ?		
5. Êtes-vous satisfait.e de votre sommeil ?	Oui	Non

## **APPENDICE D**

Questionnaire CERQ (Jermann et al., 2006)

**CERQ****Code**

:

Tout le monde se trouve un jour ou l'autre confronté à des événements négatifs ou désagréables et chacun y réagit à sa façon. En répondant aux questions suivantes, on vous demande ce que vous pensez généralement lorsque vous vivez des événements négatifs ou désagréables.

**"Lorsque je vis des événements négatifs ou désagréables..."**

	Presque jamais	Parfois	Régulière- ment	Souvent	Presque toujours
1. J'ai le sentiment que je suis celui/celle à blâmer pour ce qui s'est passé.	1	2	3	4	5
2. Je pense que je dois accepter que cela se soit passé.	1	2	3	4	5
3. Je pense souvent à ce que je ressens par rapport à ce que j'ai vécu.	1	2	3	4	5
4. Je pense à des choses plus agréables que celles que j'ai vécues.	1	2	3	4	5
5. Je pense à la meilleure façon de faire.	1	2	3	4	5
6. Je pense pouvoir apprendre quelque chose de la situation.	1	2	3	4	5
7. Je pense que tout cela aurait pu être bien pire.	1	2	3	4	5
8. Je pense souvent que ce que j'ai vécu est bien pire que ce que d'autres ont vécu.	1	2	3	4	5
9. J'ai le sentiment que les autres sont à blâmer pour ce qui s'est passé.	1	2	3	4	5
10. J'ai le sentiment que je suis responsable de ce qui s'est passé.	1	2	3	4	5
11. Je pense que je dois accepter la situation.	1	2	3	4	5
12. Je suis préoccupé(e) par ce que je pense et ce que je ressens concernant ce que j'ai vécu.	1	2	3	4	5
13. Je pense à des choses agréables qui n'ont rien à voir avec ce que j'ai vécu.	1	2	3	4	5
14. Je pense à la meilleure manière de faire face à la situation.	1	2	3	4	5
15. Je pense pouvoir devenir une personne plus forte suite à ce qui s'est passé.	1	2	3	4	5
16. Je pense que d'autres passent par des expériences bien pires.	1	2	3	4	5
17. Je repense sans cesse au fait que ce que j'ai vécu est terrible.	1	2	3	4	5

18. J'ai le sentiment que les autres sont responsables de ce qui s'est passé.	1	2	3	4	5
19. Je pense aux erreurs que j'ai commises par rapport à ce qui s'est passé.	1	2	3	4	5
20. Je pense que je ne peux rien changer à ce qui s'est passé.	1	2	3	4	5
21. Je veux comprendre pourquoi je me sens ainsi à propos de ce que j'ai vécu.	1	2	3	4	5
22. Je pense à quelque chose d'agréable plutôt qu'à ce qui s'est passé.	1	2	3	4	5
23. Je pense à la manière de changer la situation.	1	2	3	4	5
24. Je pense que la situation a aussi des côtés positifs.	1	2	3	4	5
25. Je pense que cela ne s'est pas trop mal passé en comparaison	1	2	3	4	5

	Presque jamais	Parfois	Régulière- ment	Souvent	Presque toujours
à d'autres situations.					
26. Je pense souvent que ce que j'ai vécu est le pire qui puisse arriver à quelqu'un.	1	2	3	4	5
27. Je pense aux erreurs que les autres ont commises par rapport à ce qui s'est passé.	1	2	3	4	5
28. Je pense qu'au fond je suis la cause de ce qui s'est passé.	1	2	3	4	5
29. Je pense que je dois apprendre à vivre avec ce qui s'est passé.	1	2	3	4	5
30. Je pense sans cesse aux sentiments que la situation a suscités en moi.	1	2	3	4	5
31. Je pense à des expériences agréables.	1	2	3	4	5
32. Je pense à un plan concernant la meilleure façon de faire.	1	2	3	4	5
33. Je cherche les aspects positifs de la situation.	1	2	3	4	5
34. Je me dis qu'il y a pire dans la vie.	1	2	3	4	5
35. Je pense continuellement à quel point la situation a été horrible.	1	2	3	4	5
36. J'ai le sentiment qu'au fond les autres sont la cause de ce qui s'est passé.	1	2	3	4	5

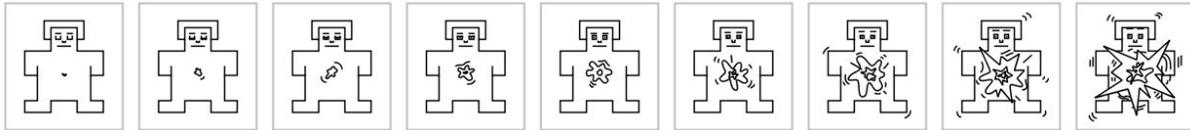
## **APPENDICE E**

Self-Assessment Manikin (Bradley & Lang, 1994)

Self-Assessment Manikin : valence

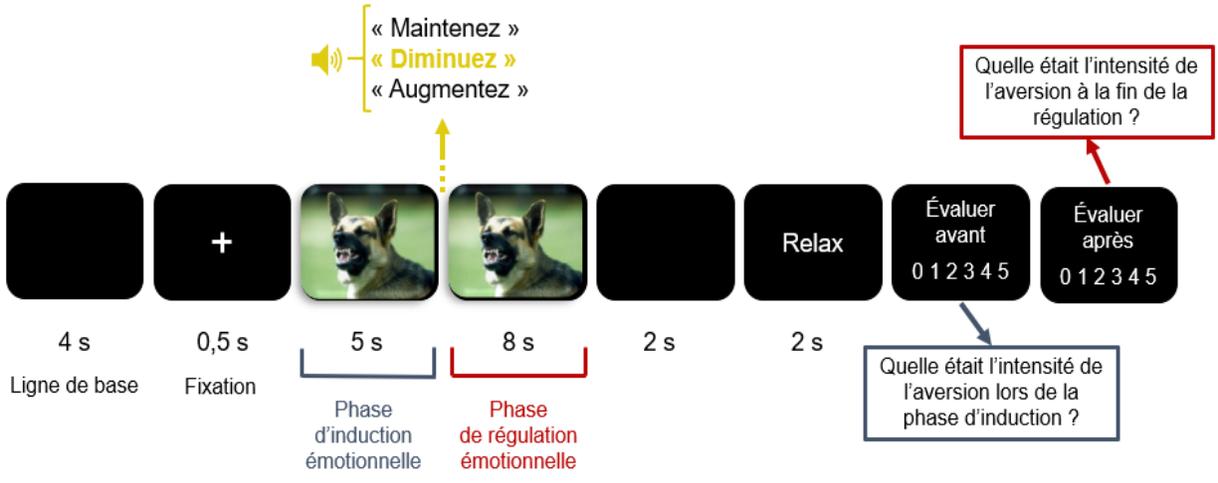


Self-Assessment Manikin : activation



## APPENDICE F

Diagramme schématique représentant la conception d'un essai



## **APPENDICE G**

Additional analysis

## **Method**

Additional analyses were performed but not included in the submitted article. Within each condition (maintain, increase, decrease) for negative pictures, averages of low theta, high theta, and alpha activity across all electrodes were compared across time segments: baseline, induction, and regulation on SPSS.

## **Analysis**

We compared the evolution of the low theta, high theta and alpha power (average over all electrodes) within each condition between the baseline (4s before the onset of the picture), the induction, the regulation segment between 1 to 3 sec, 3 to 5 sec and 5 to 7 sec with an ANOVA (factor = time(5)) and posthoc tests.

## **Results**

### ***Low theta activity within conditions***

The ANOVA (factor = time(5)) revealed at least one significant difference over time for 'maintain' ( $F(4,115) = 2.46$ ;  $p < .05$ ), 'decrease' ( $F(4,115) = 3.25$ ;  $p < .05$ ) and 'increase' ( $F(4,115) = 5.65$ ;  $p < .001$ ). Posthoc tests for 'maintain' revealed only one significant difference between the baseline and the regulation segment between 3 to 5 sec. Posthoc tests for 'decrease' revealed only one significant difference between the baseline and the regulation segment between 1 to 3 sec. Posthoc tests showed significant differences between the baseline and every regulation segment for 'increase.' Posthoc tests showed an increase in low theta power between induction and regulation between 1 to 3 sec for 'increase' but did not pass the significance threshold ( $p=0.2$ ).

### ***High theta activity within conditions***

The ANOVA (factor = time(5)) revealed at least one significant difference over time for 'maintain' ( $F(4,115) = 2.85$ ;  $p < .05$ ), 'decrease' ( $F(4,115) = 3.98$ ;  $p < .01$ ) and 'increase' ( $F(4,115) = 2.70$ ;  $p < .05$ ). Posthoc tests for 'maintain' revealed a significant difference between baseline and the regulation segment between 3 to 5 sec. Posthoc tests for 'decrease' revealed significant differences between baseline and the regulation segments between 1 to 3 sec and between 3 to 5 sec. For 'increase,' post hoc tests showed no significant differences.

### ***Alpha activity within conditions***

The ANOVA (factor = time(5)) revealed at least one significant difference over time for ‘maintain’ ( $F(4,115) = 8.74$ ;  $p < .01$ ), ‘decrease’ ( $F(4,115) = 12.04$ ;  $p < .01$ ) and ‘increase’ ( $F(4,115) = 4.29$ ;  $p < .05$ ). Posthoc tests for ‘maintain’ and ‘decrease’ revealed significant differences between baseline and every other temporal segments. For ‘increase,’ posthoc tests showed a significant difference between baseline and the 3 to 5-sec regulation segment.

These results are illustrated in Figure 2.

## **Discussion**

Low theta, High theta and alpha powers increase significantly between baseline and regulation for most of the regulation conditions. Figure 2 shows an increase between induction and regulation, especially for low theta, but it remains at the trend level. The three rhythms do not significantly increase or decrease during the regulation.