

Université de Montréal

Caractéristiques temporelles du traitement visuel dans le vieillissement sain

Par
Mélanie Lévesque

Département de psychologie
Faculté des Arts et Sciences

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Maîtrise
en psychologie

Août 2022

© Mélanie Lévesque, 2022

Université de Montréal

Psychologie / Université de Montréal / Faculté des arts et sciences

Ce mémoire intitulé

Caractéristiques temporelles du traitement visuel dans le vieillissement sain

Présenté par

Mélanie Lévesque

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

Sylvie Belleville

Président-rapporteur

Martin Arguin

Directeur de recherche

Sébastien Grenier

Membre du jury

Résumé

Le fonctionnement visuel est sujet à des modifications avec le vieillissement sain. Que ce soit l'identification, le traitement ou la perception d'un stimulus visuel, l'avancée en âge peut s'accompagner d'une altération de la vision. Afin d'investiguer les caractéristiques temporelles du traitement visuel dans le vieillissement sain, la présente étude utilise une tâche de reconnaissance d'images achromatiques d'objets communs à l'aide de la technique d'échantillonnage temporel aléatoire. Cette technique permet de révéler les mécanismes oscillatoires visuels en jeu dans la réalisation d'une tâche perceptive. 32 participants, divisés en deux groupes de 16, soit des jeunes adultes (18 - 35 ans) et des personnes âgées entre 60 et 85 ans ont pris part à l'étude. Les résultats qu'offre la technique d'échantillonnage temporel sont appelés des images de classification (IC) et montrent la variation de l'efficacité du traitement visuel à travers le temps et dans le domaine temps-fréquence. Pour chacun des domaines, les IC sont également décomposées selon leurs spectres de puissance et de phase par une analyse de Fourier. Les résultats montrent des différences significatives entre les groupes pour les IC temporelles et temps-fréquence. De plus, autant dans le domaine temporel que temps-fréquence, ce sont les spectres de phase qui se distinguent significativement entre les deux groupes alors que les spectres de puissance des IC ne diffèrent pas. Il apparaît donc que les mécanismes oscillatoires en jeu pour la réalisation de la tâche de reconnaissance d'objets sont différents d'un groupe à l'autre. Spécifiquement, il s'agirait de la chronologie de leur engagement dans la tâche qui diffère.

Mots-clés : Échantillonnage temporel, vieillissement sain, traitement visuel, objets familiers, oscillations cérébrales

Abstract

Visual function is subject to some modifications with healthy aging. Whether it is the identification, processing, or perception of a visual stimulus, advancing age can be accompanied by an alteration of vision. To investigate the temporal characteristics of visual processing in healthy aging, the present study uses a recognition task of achromatic images of common object using the random temporal sampling technique. This technique reveals the visual oscillatory mechanisms at play in the realization of a perceptual task. 32 participants, divided into two groups of 16, young adults (18-35 years old) and elderly between 60 and 85 years old took part in this study. The results of the temporal sampling technique are called classification images (CI) and show the variation of visual processing efficiency across time and time-frequency domain. For each domain, CIs were also decomposed according to their power and phase spectra by Fourier analysis. The results show significant differences between groups for the time and time-frequency CIs. In addition, both in the time and time-frequency domains, it is the phase spectra that differ significantly between groups whereas the power spectra do not differ. It thus appears that the oscillatory mechanisms involved in carrying out object recognition are different from one group to another. Specifically, it is the timing of the engagement of these oscillatory mechanisms that differs between groups.

Keywords : temporal sampling, healthy aging, visual processing, common object, brain oscillations

Table des matières

Table des matières

<i>Résumé</i>	5
<i>Abstract</i>	7
<i>Table des matières</i>	9
<i>Liste des tableaux</i>	11
<i>Liste des figures</i>	13
<i>Liste des sigles et abréviations</i>	15
<i>Remerciements</i>	19
<i>Chapitre 1 : Introduction</i>	21
<i>Chapitre 2 : Contexte théorique</i>	23
Effet du vieillissement normal.....	23
Hétérogénéité dans le vieillissement sain.....	26
La vision dans le vieillissement.....	28
Oscillations cérébrales.....	32
Oscillations cérébrales dans le vieillissement sain.....	34
Technique d'échantillonnage temporel.....	37
<i>Chapitre 3 – Hypothèse</i>	41
<i>Chapitre 4 : Méthodologie</i>	43
Participants.....	43
Stimuli.....	43
Matériel.....	44
Procédure.....	44
Cognistat.....	47
Traitement des données et analyses statistiques.....	48
<i>Chapitre 5 – Résultats</i>	53
Informations générales.....	53
Sous-tests de Cognistat.....	53
Images de classification temporelles.....	54
Images de classification temps-fréquence.....	57

Cohérence intra-groupe	61
<i>Chapitre 6 – Discussion.....</i>	65
<i>Chapitre 7 – Conclusions.....</i>	73
<i>Références bibliographiques.....</i>	75

Liste des tableaux

Tableau 1. Tests-T des sous-test du Cognistat	53
Tableau 2. Coefficients de corrélation intra-groupe	62

Liste des figures

Figure 1. Exemples de modifications cérébrales liées au vieillissement normal (Lemaitre et al. (2012).....	24
Figure 2. Exemple de stimulus cible utilisé dans l'étude de Bertone et al. (2011)	29
Figure 3. Représentation du réseau du mode par défaut. Hafkemeijer et al. (2012).....	35
Figure 4. Exemples d'images utilisées pour l'étude tirées de la Bank of Standardized Stimuli (BOSS).....	44
Figure 5. Exemple du déroulement d'un essai de cette étude	47
Figure 6 -Exemple de profil graphique des performances offert par Cognistat une fois l'évaluation complétée.	48
Figure 7. Image de classification temporelle de l'efficacité du traitement visuel en fonction du temps depuis l'apparition de la cible pour les jeunes adultes (a) et les personnes âgées (b).	55
Figure 8. Contraste de l'efficacité du traitement visuel à travers le temps depuis l'apparition du stimulus entre les jeunes adultes et les personnes âgées	56
Figure 9. Spectres de puissance et de phase des ICs temporelles. Les spectres de puissance semblent similaires entre les groupes alors que les spectres de phase diffèrent entre les groupes	57
Figure 10. Images de classification dans le domaine temps-fréquence de l'efficacité du traitement visuel en fonction des fréquences RSB à travers le temps pour les jeunes adultes (a) et les personnes âgées (b).....	59
Figure 11. Contraste de l'efficacité du traitement visuel en fonction des fréquences RSB à travers le temps depuis l'apparition du stimulus entre les jeunes adultes et les personnes âgées.	60
Figure 12. Spectres de puissance et de phase des ICs temps-fréquence. Les spectres de puissance semblent similaires entre les groupes alors que les spectres de phase diffèrent entre les groupes.	61

Liste des sigles et abréviations

CCI : Coefficient de corrélation intra-groupe

EEG : Électroencéphalogramme

ERO : Oscillations reliées aux événements

Hz : Hertz

IC : Images de classification

IRMf : Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

LRP : Potentiel de préparation latéralisé

MA : Maladie d'Alzheimer

MS : millisecondes

PAE : Potentiels associés aux événements

PCN : Négativité postérieure controlatérale

RSB : ratio signal/bruit

SPCN : Négativité postérieure controlatérale soutenue

TCL : Trouble cognitif léger

*À ma mamie & ma grand-maman,
Avec qui j'aurais aimé partager cet accomplissement*

Remerciements

Je voudrais d'abord remercier mon directeur de recherche, Martin Arguin, qui m'a donné une chance de découvrir la recherche, les neurosciences cognitives et de pouvoir étudier le vieillissement sous un nouvel angle. Je voudrais aussi le remercier pour la patience dont il fait preuve pour répondre (et re-répondre) à mes questions.

Je voudrais aussi remercier mes parents, mon frère et mon copain, sans qui je n'aurais pas pu traverser toutes ses étapes et qui me supportent depuis le tout premier jour des mes études universitaires. Merci aussi à toute ma famille plus éloignée et mes amis qui m'encourage aussi dans ce voyage universitaire.

Chapitre 1 : Introduction

C'est maintenant un fait connu que la population mondiale connaît un vieillissement accru. Au Canada, c'est plus de 1 600 000 personnes qui sont âgées d'au moins 65 ans (Fédération Québécoise des Sociétés Alzheimer). Sachant que l'âge est un facteur de risque de développer des maladies neurodégénératives, il devient donc important de bien comprendre les effets que peut avoir le vieillissement sur les individus et d'être en mesure de différencier le vieillissement cognitif sain du vieillissement pathologique. Un aspect important, et potentiellement problématique dans l'étude du vieillissement, est la présence d'une grande hétérogénéité à-même la population dite normale, mais aussi chez la population dite pathologique. Que ce soit au niveau cognitif, biologique ou même social, il est possible de constater une hétérogénéité dans les différentes trajectoires du vieillissement.

Pour être en mesure de bien identifier et comprendre le vieillissement pathologique, il faut aussi être en mesure de bien comprendre le vieillissement sain. Quels sont les impacts d'un vieillissement dit normal sur les individus ? Retrouve-t-on certains déficits dans le vieillissement normal ? À quel moment parle-t-on d'un vieillissement pathologique ? Ce sont toutes des questions qui sont toujours à l'étude et pour lesquelles la recherche est importante. Dans cette optique, le présent mémoire s'intéresse à l'effet du vieillissement normal sur le fonctionnement visuel. La méthode d'échantillonnage temporel aléatoire qui est utilisée pour ce mémoire a été développée et utilisée principalement auprès d'une population jeune et neurotypique afin d'y révéler les caractéristiques oscillatoires du traitement visuel dans une variété de tâches. De ce fait, il sera possible de voir les différences, s'il y en a, entre des individus plus âgés et des individus jeunes par rapport au fonctionnement visuel.

L'introduction de ce mémoire sera divisée en plusieurs sections. D'abord, l'effet du vieillissement normal sera abordé et décrira les différentes modifications pouvant survenir avec l'avancée en âge. Il sera ensuite question de l'hétérogénéité cognitive que l'on retrouve dans le vieillissement sain et qui rend plus difficile la compréhension des différentes trajectoires possibles dans le vieillissement. Un aperçu des changements se produisant au niveau de la vision chez les individus âgés sera décrit et sera suivi d'une description des oscillations cérébrales. Finalement, l'introduction se fermera sur une description des différentes études faites au niveau des oscillations cérébrales dans le vieillissement et par une description de la technique d'échantillonnage temporel utilisée pour cette étude.

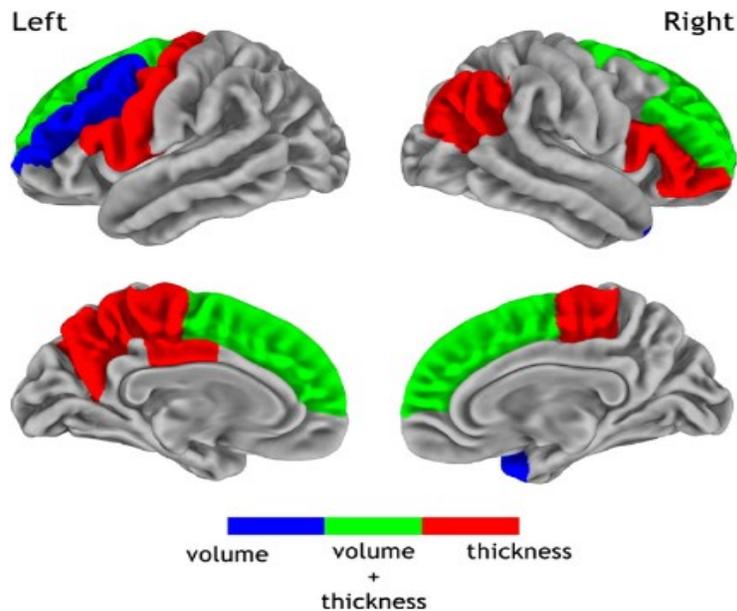
Chapitre 2 : Contexte théorique

Effet du vieillissement normal

Le vieillissement normal implique plusieurs modifications chez les individus, que ce soit au plan biologique (e.g. Dziechciaz et Filip, 2014; Foo et al., 2019; Grajauskas et al., 2019), cognitif (e.g. Birren et Fisher, 1995; Lindenberger, 2014; West et al., 2002), sensoriel (e.g. Allard et al., 2013; Huang et Tang, 2010; Vandervoort, 2002) et même social (e.g. Dziechciaz et Filip, 2014). Quant aux habiletés cognitives, plusieurs études ont détaillé les changements qui peuvent se produire avec l'avancée en âge (Birren et Fisher, 1995; Bordaberry et al., 2012; Bridger et al., 2017; Juan et Adlard, 2019 ; pour des revues littéraires : Harada et al., 2013; Hasher et Zacks, 1988; Kemp et al., 2012). Parmi les aspects pouvant connaître un déclin avec le vieillissement, on retrouve la vitesse de traitement de l'information, la mémoire, les habiletés visuospatiales et les fonctions exécutives. Le langage reste majoritairement intact avec le vieillissement, sauf en ce qui a trait à la fluence verbale, c'est-à-dire la capacité de générer et/ou trouver des mots d'une certaine catégorie dans une limite de temps donnée, qui peut connaître un déclin (Harada et al., 2013). Par ailleurs, Ehrle et al. (2008) ont démontré que le vieillissement normal semble affecter les tâches de dénomination d'objets et ce, que les stimuli soient présentés de façon visuelle ou auditive. Toutefois, ils mentionnent que les connaissances sémantiques des personnes plus âgées semblent préservées dans le vieillissement sain (Ehrle et al., 2008).

Au niveau cérébral, les modifications les mieux documentées concernent la diminution du volume cérébral total, principalement l'atrophie de la matière grise et de la matière blanche (pour des revues de littérature : Galluzzi et al., 2008; Grajauskas et al., 2019). L'atrophie cérébrale fait référence à une modification morphologique du cerveau due à une réduction du volume des tissus parenchymateux (Grajauskas et al., 2019). Les régions les plus touchées par l'atrophie sont le

cortex entorhinal, l'hippocampe, le putamen, le gyrus précentral, l'amygdale, le thalamus ainsi que les noyaux accumbens et caudé (Grajauskas et al., 2019). De plus, Juan et Adlard (2019) expliquent que des perturbations de l'intégrité synaptique et de la neurotransmission contribuent au déclin cognitif lié à l'âge.



Les changements qui se produisent au niveau cérébral avec le vieillissement pourraient être une voie possible expliquant les modifications du fonctionnement cognitif. En effet, une étude comparant des individus ayant de bonnes performances cognitives et des individus ayant de mauvaises performances cognitives suggère l'importance de l'insula ainsi que du cortex préfrontal (Lee et al., 2016). Précisément, les auteurs ont démontré que les individus qui performaient moins bien aux différents tests cognitifs présentaient des perturbations au niveau de la connectivité fonctionnelle, qui se définit comme la corrélation entre l'activité cérébrale de

deux régions (Toepper, 2017), de l'insula droite et du cortex préfrontal. Au contraire, les individus avec de bonnes performances cognitives présentaient un déclin de la connectivité fonctionnelle entre l'insula gauche et le cortex préfrontal (Lee et al., 2016). Une autre étude a conclu, de façon plus générale, que les changements cognitifs étaient liés à des patrons spécifiques de changements du volume cérébral. En ce sens, ils mentionnent que plus la réduction du volume cérébral et l'expansion des ventricules sont rapides, plus les changements cognitifs le sont aussi (Armstrong et al., 2020). Ils ont d'ailleurs montré que les déclinés observés en mémoire sont liés à un déclin du volume cérébral dans les régions du lobe temporal médian, que les déficits en fluence verbale sont liés à une diminution du volume cérébral plus étendue à travers le cerveau et que la diminution des habiletés visuospatiales est liée à une perte de volume au niveau des régions du lobule pariétal supérieur, du précuneus et du gyrus temporal inférieur (Armstrong et al., 2020).

Les changements cérébraux rencontrés dans le vieillissement normal peuvent-ils s'étendre au vieillissement pathologique, à la manière d'un continuum ou, au contraire, les changements sont-ils complètement différents lorsqu'il est question d'une pathologie ? Dans sa revue de littérature, par exemple, Toepper (2017) mentionne qu'il n'est pas possible de voir la maladie d'Alzheimer (MA) comme étant une accélération du processus normal de vieillissement. En ce sens, il souligne certaines différences entre le vieillissement normal et les individus ayant une MA; par exemple chez les individus avec la MA, la perte de volume de la matière grise est plus grande que celle de la matière blanche, alors que dans le vieillissement normal, ce ratio est plus équilibré. Aussi, les régions les plus touchées par l'atrophie de la matière grise et blanche chez les individus avec la MA semblent être le lobe temporal médian (hippocampe) et le lobe pariétal,

alors que les individus présentant un vieillissement sain semblent plus vulnérables au niveau du cortex préfrontal (Toepper, 2017).

Hétérogénéité dans le vieillissement sain

Pour bien comprendre les changements qui peuvent se produire avec le vieillissement sain, il devient donc important de pouvoir différencier celui-ci d'un vieillissement moins optimal et même pathologique. De ce fait, il serait alors possible d'identifier les individus plus à risque d'évoluer vers une atteinte neurologique dégénérative telle que la démence. À l'inverse, connaître les différents aspects d'un vieillissement sain permettrait d'améliorer la prévention auprès des individus âgés avant l'installation d'un déclin cognitif objectif. Des études se sont attardées à l'évolution des capacités cognitives, entre autres, ainsi qu'au différentes trajectoires possibles dans le vieillissement (Foss et al., 2009; MacAulay et al., 2020; Lavallée, 2020; Royall et al., 2005; Valdois et al., 1990; Ylikoski et al., 1999). Une bonne caractérisation des aspects qui distinguent ces trajectoires permettrait de mieux identifier les individus à risque d'évoluer vers une démence.

Ylikoski et al. (1999) ont pu identifier, parmi des individus âgés de 55 à 85 ans, cinq profils, qu'ils ont ensuite regroupés en trois catégories (ou trajectoires). Un premier groupe est identifié comme étant celui du vieillissement optimal, c'est-à-dire que les individus de ce groupe ont des performances au-dessus de la moyenne dans toutes les mesures utilisées pour l'étude. Un second groupe représente les individus avec plusieurs difficultés dans les tests (performances sous la moyenne dans pratiquement toutes les mesures) ainsi qu'avec les plus hauts scores sur l'inventaire de dépression. Les auteurs ajoutent que, de ces individus, 82% pourraient être identifiés comme ayant un déclin cognitif objectif et 54% avec un diagnostic de trouble cognitif léger (TCL). Le TCL est un syndrome caractérisé par un déclin du fonctionnement cognitif qui

n'interfère pas significativement avec le quotidien de l'individu, mais qui comporte un risque de conversion vers une démence, souvent de type Alzheimer (Gauthier et al., 2006). Le troisième groupe est composé des individus performant autour de la moyenne, représentant un vieillissement dit normal. Fait intéressant, les auteurs notent une plus grande hétérogénéité des performances à l'intérieur de ce groupe comparativement aux deux autres. Par exemple, certains individus ont des difficultés dans des tâches de rétention (rappel différé) au niveau visuel et verbal, mais pas ailleurs ; d'autres ont des déficits plus prononcés en mémoire visuelle, au niveau des habiletés visuoconstructives et dans la rapidité de traitement de l'information ; alors que d'autres, aussi près de la moyenne, ont des difficultés plus marquées en langage. Il est donc possible de constater une hétérogénéité importante des trajectoires associées au vieillissement normal.

Certains facteurs, expliquant cette hétérogénéité, peuvent être identifiés. En effet, les femmes semblent démontrer de meilleures capacités de mémoire verbale et d'attention que les hommes (MacAulay et al., 2020). Avoir des symptômes dépressifs est associé à de moins bonnes performances mnésiques, d'attention et de langage, alors que des facteurs de risques vasculaire et/ou métaboliques sont associés à des déficits en mémoire, en attention ainsi qu'en mémoire de travail (MacAulay et al., 2020). Finalement, de meilleures performances cognitives sont liées à un haut niveau d'éducation (MacAulay et al., 2020). Dans un même ordre d'idées, un haut niveau d'éducation, un style de vie sain ainsi que l'intelligence sont liés au principe de réserve cognitive (Villeneuve et Belleville, 2010). Celui-ci se définit comme une amélioration des ressources neuronales (Cabeza et al., 2018) qui serait associée à la présence de réseaux neuronaux ou de stratégies cognitives plus efficaces (Villeneuve et Belleville, 2010). Les individus ayant une

meilleure réserve cognitive auraient des risques diminués de développer une démence plus tard (ou du moins pourraient voir retarder son apparition) (Villeneuve et Belleville, 2010).

Considérant les études présentées ci-haut, il est clair que le vieillissement normal peut être difficile à interpréter étant donné les différentes trajectoires possibles, les différents aspects sujets à des modifications et les différents facteurs venant jouer sur les différences inter et intra-individuelles (e.g. dispersion dans les performances cognitives chez un individu). C'est pourquoi le présent mémoire s'intéresse à un domaine en particulier dans lequel il existe aussi des modifications avec l'âge, soit le fonctionnement visuel, afin d'ajouter aux connaissances déjà présentes sur les changements qui se produisent dans le vieillissement. La prochaine section sera consacrée aux études ayant démontré les différents impacts du vieillissement normal sur le fonctionnement visuel des individus.

La vision dans le vieillissement

La vision subit des modifications ou des altérations avec le vieillissement. Plusieurs composantes du système visuel sont sujettes à un déclin avec le vieillissement, mais elles ne déclinent pas de la même façon ni à la même vitesse (Faubert, 2002). Entre autres, des études ont montré des différences liées à l'âge dans les domaines de la sensibilité au contraste (Allard et al., 2013; Elliott, 1987; Owsley et al., 1983; Ross et al., 1985; Tang et Zhou, 2009), de l'acuité visuelle (La Fleur et Salthouse, 2014), de la surcharge visuelle (Scialfa et al., 2013) et de la perception du mouvement (Legault et Faubert, 2012 ; pour des revues littéraires : Faubert, 2002; Owsley, 2011).

Une étude utilisant le Landolt-C et comparant plusieurs tranches d'âge (allant de 18 à 65 ans et plus) a utilisé des stimuli statiques définis par la luminance, référant à un stimulus de premier ordre et des stimuli définis par la texture, constituant un stimulus de deuxième ordre.

Dans le cas des stimuli de premier ordre, le traitement visuel est plus élémentaire alors que pour les stimuli de deuxième ordre, le traitement visuel implique des processus neuronaux de haut niveau allant au-delà du cortex visuel (e.g. aires visuelles extra-striées). Les résultats démontrent que la sensibilité à l'information statique définie par la luminance diminue légèrement avec l'âge alors que la sensibilité à l'information définie par la texture connaît un déclin significatif marqué avec l'âge (Bertone et al., 2011). Les auteurs concluent que le vieillissement normal semble affecter davantage le traitement des informations visuelles de haut niveau que le traitement de bas niveau.

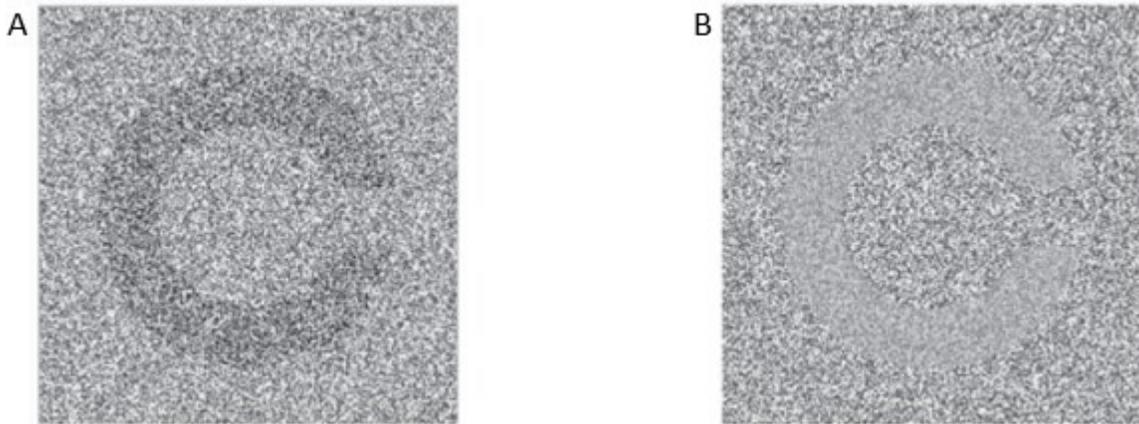


Figure 2. Exemple de stimulus cible utilisé dans l'étude de Bertone et al. (2011)

L'image en A illustre un stimulus défini par luminance et l'image en B illustre un stimulus défini par contraste.

Des auteurs ont démontré que les personnes âgées ont plus de difficulté à discriminer des barres obliques d'orientations différentes comparativement à de jeunes adultes, alors qu'ils performant de manière équivalente pour les orientations cardinales (i.e. horizontale ou verticale) (Pilz et al., 2020). Roudaia et al. (2013) ont démontré que l'âge n'a pas d'effet sur l'intégration de contours pour les distances inter-éléments utilisées dans leur étude et que les personnes âgées,

comme les jeunes adultes, peuvent discriminer des contours saillants même à de très courtes durées de présentation (0.04 s). Cependant, pour des contours moins saillants la performance des personnes âgées diminue avec la durée de présentation (Roudaia et al., 2013).

Les études présentées ci-haut montrent quels sont les effets potentiels de l'âge sur le fonctionnement visuel. Ces études concernent toutefois des composantes très spécifiques du fonctionnement visuel. Cependant, qu'en est-il pour le fonctionnement visuel dans des situations plus concrètes de la vie de tous les jours ? Une étude voulant tester la détection d'une motocyclette en périphérie du champ de vision des personnes âgées lors de la conduite automobile a démontré que la détection elle-même est moindre pour les individus plus âgés, qu'elle diminue encore plus lorsqu'on s'éloigne en périphérie du champ visuel ou que la charge cognitive augmente (Savage et al., 2019). Par ailleurs, dans une tâche de mémoire visuelle à court terme (mémoire pour des objets, pour leur localisation et pour des associations objet-localisation ou nom-localisation), les personnes âgées performant moins bien lorsqu'ils doivent se remémorer des associations objet-localisation, peu importe la charge cognitive (faible ou élevée) du contexte dans lequel la tâche est réalisée (Sapkota et al., 2020). Les résultats de cette étude démontrent que les individus âgés présentent un déficit dans des tâches de mémoire visuelle à court terme qui nécessitent une association entre un objet et sa localisation ou le nom de l'objet et sa localisation. Ces résultats semblent à même d'expliquer les plaintes de mémoire des personnes âgées dans des environnements complexes où plusieurs modalités (visuelle, auditive et visuo-spatiale) sont impliquées (Sapkota et al., 2020). Les modifications visuelles qui peuvent survenir dans le vieillissement sain peuvent donc avoir un impact sur le quotidien (conduite automobile, reconnaissance d'objets, etc.) et peuvent ainsi avoir un effet sur les performances cognitives des personnes âgées.

Des études combinant des tâches perceptives et des méthodes d'imagerie cérébrales (e.g. électroencéphalogramme (EEG), imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)) permettent de mieux comprendre l'activité cérébrale lors de la réalisation de ces tâches. De plus, ce type d'étude permet de mieux comprendre les modifications du fonctionnement visuel liées à l'âge. Pour exemple, une étude s'est intéressée aux temps de réponse combinés avec la mesure de différentes composantes des potentiels reliés aux événements (PREs) pendant une tâche de recherche visuelle (Wiegand et al., 2013). Les PREs sont le reflet de l'activité synchrone d'ensembles neuronaux qui peuvent être associés à des processus cognitifs spécifiques et qui sont généralement analysés à travers le temps (Herrmann et al., 2014). Les composantes PRE d'intérêt dans cette étude étaient: la négativité postérieure controlatérale (*posterior contralateral negativity* ; PCN), généralement associée à l'attention sélective, la négativité postérieure controlatérale soutenue (*sustained posterior contralateral negativity* ; SPCN), qui reflète l'activation de la mémoire visuelle à court terme, et le potentiel de préparation latéralisé (*lateralized readiness potential* ; LRP) qui est lié à l'activation et à l'exécution d'une réponse motrice. Les résultats montrent une PCN plus tardive chez les personnes âgées, démontrant que plus de temps leur serait nécessaire pour diriger leur attention sur une cible. La composante SPCN apparaissant plus tardivement et de façon moins prononcée chez les personnes âgées, implique une diminution de la capacité de la mémoire visuelle à court terme. Une composante LRP, plus ample et de plus longue durée chez le groupe âgé, démontre qu'ils ont besoin de plus de temps pour exécuter la réponse motrice (Wiegand et al., 2013). Bref, il est donc intéressant d'étudier les performances visuelles des personnes âgées lors de l'enregistrement de l'activité cérébrale puisque cela nous permet d'approfondir notre compréhension des modifications qui se produisent durant le vieillissement sain.

Oscillations cérébrales

L'étude des oscillations cérébrales permet de caractériser l'activité cérébrale durant l'exécution de diverses tâches cognitives et au repos. L'électroencéphalogramme (EEG) permet de mesurer l'activité électrique de populations de neurones ainsi que les interactions entre différentes régions cérébrales ou différents réseaux neuronaux à travers le temps (Sauseng et Klimesch, 2008). L'application d'une analyse de Fourier sur le signal EEG révèle l'existence de phénomènes oscillatoires sous-jacents.

À travers les études, il a été possible d'identifier différents types d'oscillations, chacun étant représenté par une étendue particulière de fréquences (mesurées en Hertz (Hz)). Parmi les plus étudiées, on retrouve les oscillations delta (1 à 4 Hz), thêta (4 à 7 Hz), alpha (8 à 12 Hz), bêta (15 à 30 Hz) ainsi que gamma (30 à 90 Hz). Ces différentes fréquences d'oscillation ont pu être liées à des processus cognitifs distincts. Ainsi, les oscillations delta seraient liées, entre autres, au calcul mental, à la mémoire de travail, à l'inhibition, au traitement sémantique, à la méditation (Harmony, 2013) et à des tâches attentionnelles comme la détection d'une cible (Herrmann et al., 2016). Les oscillations thêta, quant à elles, seraient généralement associées à des tâches de mémoire et des tâches exécutives nécessitant l'inhibition d'éléments distracteurs (Herrmann et al., 2016). Bossi et al. (2020) ont démontré, à l'aide d'une tâche de reconnaissance de visages à l'endroit et inversés, que l'activité thêta est plus forte pour les visages inversés, reflétant possiblement le recours à une plus grande quantité de ressources attentionnelles. Les oscillations de type alpha, qui sont beaucoup étudiées, seraient liées à des tâches d'inhibition (Van Diepen et al., 2019) et à la vitesse de traitement de l'information (i.e. les individus présentant une activité alpha élevée ont des temps de réponse plus rapide) (Klimesch, 1999). Par ailleurs, la désynchronisation (formes d'ondes irrégulières) des oscillations alpha de basse fréquence (6 à 10 Hz) semble liée aux processus attentionnels alors que la désynchronisation des

oscillations alpha de haute fréquence (10 à 12 Hz) serait plutôt liée à des tâches de mémoire sémantique (Klimesch, 1999). Dans leur revue de littérature, Van Diepen et al. (2019) mentionnent que lorsque l'activité des ondes alpha est moins grande dans la période pré-stimulus, la performance des individus dans une tâche de détection est meilleure. De plus, lorsque des participants doivent effectuer une tâche de discrimination entre des objets réels et des non-objets, seuls les objets réels donnent lieu à une suppression de l'activité oscillatoire alpha. En ce qui concerne les oscillations bêta, elles sont généralement associées au rythme par défaut (*default rhythm*) du système sensorimoteur (Betti et al., 2021). En effet, il est possible de remarquer une désynchronisation de l'activité bêta durant la planification d'un mouvement ainsi que durant son exécution (Betti et al., 2021; Engel et Fries, 2010), alors que son amplitude augmente à l'arrêt du mouvement (Betti et al., 2021). Les oscillations bêta seraient également liées à des tâches de recherche visuelle (Betti et al., 2021; Engel et Fries, 2010) ainsi qu'au traitement de la parole (Betti et al., 2021). Finalement, les oscillations gamma semblent liées à la conscience perceptive des événements (Rieder et al., 2011; Sauve, 1999), à la capacité de distinguer deux tonalités et à des tâches de recherche visuelle ainsi qu'à des tâches de reconnaissance d'objets (Sauve, 1999). Elles sont également liées à la détection de contacts tactiles rapprochés dans le temps (i.e. lorsque les deux contacts sont séparés de 12 millisecondes et moins, les participants n'en perçoivent qu'un seul) (Rieder et al., 2011; Sauve, 1999), à la reconnaissance auditive de mots (comparativement à des pseudo-mots) (Sauve, 1999) et à la mémoire à court terme et à long terme (Rieder et al., 2011).

En général, les résultats présentés ci-haut proviennent d'études menées sur des populations neurotypiques et généralement jeunes. Ces connaissances nous permettent de mieux comprendre les processus neuronaux en jeu durant des tâches cognitives, mais seulement pour les

populations visées dans leur méthodologie. Puisqu'il est maintenant connu qu'avec le vieillissement, il y a une modification des performances cognitives, il est possible de s'attendre à ce que les processus neuronaux soient eux aussi modifiés. En ce sens, identifier les modifications au niveau cérébral ainsi qu'au niveau des oscillations permettrait d'approfondir les connaissances au sujet des changements cognitifs associés au vieillissement sain.

Oscillations cérébrales dans le vieillissement sain

L'étude des oscillations cérébrales dans le vieillissement attire de plus en plus l'attention, car elle permet de mieux comprendre les mécanismes cérébraux qui entrent en jeu durant différentes tâches cognitives ainsi que les modifications qui s'y produisent en fonction de l'âge. On retrouve des études portant sur les oscillations cérébrales dans le vieillissement et les fonctions cognitives et/ou sensorielles (e.g. Borghini et al., 2018; Cheng et al., 2015; Dushanova et Christov, 2014; Enriquez-Geppert et Barcelo, 2018; Kulasingham et al., 2020; Missonnier et al., 2011; Rossiter et al., 2014; Schmiedt-Fehr et Basar-Eroglu, 2011; Sebastian et Ballesteros, 2012; Wiesman et Wilson, 2019; Yordanova et al., 1998), sur les réseaux neuronaux dans le vieillissement (Fleck et al., 2016; Hou et al., 2018; Knyazev et al., 2015; Wang et al., 2017) ou sur les oscillations à l'état de repos chez les individus âgés (Esposito et al., 2018; Hoshi et Shigihara, 2020; Jabes et al., 2021; Sambataro et al., 2010; Vlahou et al., 2014).

Dans une tâche d'amorçage haptique, des chercheurs ont observé que le groupe de jeunes adultes (âge moyen : 29 ans) et le groupe de personnes âgées (âge moyen : 66 ans) différaient au niveau de leur patron d'activité cérébrale (Sebastian et Ballesteros, 2012). En effet, les individus plus âgés présentaient une diminution de l'activité dans la première bande alpha inférieure (6-8 Hz), reflétant un état d'éveil plus marqué durant la tâche ainsi que moins d'amplitude dans la deuxième bande alpha inférieure (8-10 Hz), indiquant qu'ils portent davantage attention durant la

tâche et qu'ils ont possiblement besoin de déployer plus d'effort pour maintenir cette attention (Sebastian et Ballesteros, 2012). Une étude de Dushanova et Christov (2014) a mesuré une augmentation de l'activité delta et thêta chez les personnes âgées, comparativement au groupe jeune, répandue sur tout le cuir chevelu durant le traitement sensoriel dans une tâche motrice de discrimination auditive. Aussi, ils ont trouvé, pour le traitement cognitif, que les personnes âgées présentaient une activité delta plus élevée que le groupe plus jeune. Les auteurs concluent que les réponses oscillatoires de différentes bandes de fréquence sont modulées par le traitement sensoriel et cognitif, mais aussi par l'âge. Dans une tâche de discrimination visuospatiale, une corrélation négative a été trouvée entre l'activité dans la bande de fréquence thêta et l'âge, suggérant une diminution du contrôle exécutif avec l'avancée en âge (Wiesman et Wilson, 2019).

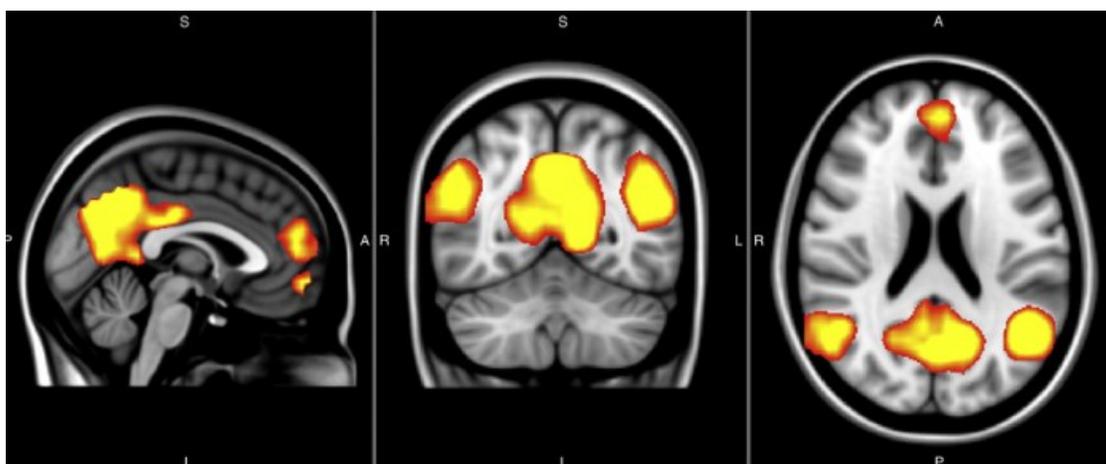


Figure 3. Représentation du réseau du mode par défaut. Hafkemeijer et al. (2012).

La majorité des études présentées plus haut impliquent la réalisation de tâches cognitives par les participants. Les résultats qu'elles présentent au niveau de l'activité oscillatoire permettent de mieux comprendre ce qui sous-tend les modifications du fonctionnement cognitif au cours du vieillissement. Toutefois, l'activité cérébrale à l'état de repos (i.e. sans faire de tâches cognitives) est aussi une façon d'étudier les modifications du fonctionnement cérébral avec le vieillissement.

Des chercheurs se sont intéressés au possible lien entre l'activité oscillatoire au repos et les performances au *Trail-making test*. Ceux-ci rapportent que pour les personnes âgées (comparativement aux jeunes adultes), une augmentation de la puissance des ondes plus lentes (e.g. delta, thêta, alpha) est liée à de meilleures performances à la tâche (Vlahou et al., 2014). Les auteurs concluent que le vieillissement sain est associé à une diminution globale de l'activité des oscillations cérébrales lentes et à une diminution des performances à différentes tâches cognitives. À l'appui de cette conclusion, ils remarquent également que les personnes âgées ayant des niveaux d'activités oscillatoires des ondes lentes plus élevés performant mieux sur le plan de la vitesse de traitement (Vlahou et al., 2014). Une autre étude, utilisant une tâche de mémoire de travail spatiale, rapporte des résultats qui semblent concorder avec ceux de Vlahou et al. (2014). Les auteurs ont trouvé que les personnes plus âgées ont de moins bonnes performances à la tâche que les jeunes adultes et que leur activité oscillatoire spontanée dans les bandes de fréquences thêta et alpha est également moins marquée (Jabes et al., 2021).

Les études présentées ci-haut indiquent que des méthodologies combinant des tâches perceptives et/ou cognitives et l'imagerie cérébrale peuvent aider à mieux comprendre les modifications qui se produisent dans le vieillissement sain. En effet, savoir par exemple que les personnes plus âgées présentent un ralentissement du traitement de l'information relativement aux jeunes adultes est utile, mais il importe aussi de savoir ce qui sous-tend ces modifications. Les oscillations cérébrales offrent une fenêtre sur les processus qui peuvent mener à ces modifications dans l'efficacité perceptive et/ou cognitive présentes dans le vieillissement sain. De plus, comprendre et identifier les changements qui se produisent dans l'activité oscillatoire spontanée (i.e. sans l'exécution de tâches cognitives) peut aussi être un outil à la compréhension des changements cérébraux qui se produisent avec l'avancée en âge.

Les techniques d'imagerie utilisées pour étudier les oscillations cérébrales impliquent toutefois l'installation de dispositif sur la tête des participants (e.g. EEG) ou l'installation du participant dans un espace clos (e.g. magnétoencéphalographie - MEG). Ces techniques, bien que très utiles et performantes, font appel à un équipement relativement sophistiqué et peuvent être encombrantes pour des individus plus âgés. La technique proposée dans ce mémoire permet de révéler les mécanismes oscillatoires en jeu durant la réalisation de tâches perceptives sans pour autant nécessiter de tel dispositifs. La prochaine section décrit cette technique ainsi que les résultats obtenus avec celle-ci jusqu'à présent.

Technique d'échantillonnage temporel

La technique d'échantillonnage temporel aléatoire utilisée pour ce mémoire permet de révéler les mécanismes oscillatoires visuels en jeux dans la réalisation d'une tâche perceptive (Arguin et al., 2021; Blais et al., 2013). Cette technique consiste à faire varier la visibilité d'un stimulus cible (par manipulation du rapport signal/bruit) de manière aléatoire et avec une fréquence élevée pendant toute sa durée d'exposition. Suite au traitement des résultats, on obtient des images de classification (IC) qui reflètent les variations dans l'efficacité du traitement perceptivo-cognitif du participant en fonction des caractéristiques temporelles de la stimulation. Cette technique a d'ailleurs été validée pour différentes classes de stimuli que les participants devaient reconnaître (Achouline et Arguin, 2019; Arguin, 2018; Arguin et Massé, 2019; Ferrandez et Arguin, 2019). Cette méthode a révélé, entre autres, des patrons oscillatoires uniques selon le type de stimulus utilisé. Dans une tâche de reconnaissance de mots, l'efficacité est la meilleure pour les fréquences signal/bruit entre 15 et 30 Hz dans l'intervalle 0 à 115 ms ainsi qu'à 55 Hz durant l'intervalle de 145 à 170 ms (Arguin, 2018). Ferrandez (2019) a démontré que pour la reconnaissance d'objets familiers, les fréquences signal/bruit entre 25 et 35 Hz (0 à 67 ms) étaient liées aux meilleures performances alors que pour la reconnaissance de visages

familiers, les performances sont optimales pour les fréquences signal/bruit de 30 à 55 Hz (0 à 67 ms). Au travers des études, une cohérence inter sujets très élevée a pu être obtenue dans les spectres de puissance des images de classification pour une tâche particulière. Ces mêmes spectres de puissance sont également distincts selon la classe de stimulus à reconnaître (objets familiers, objets non-familiers, mots ou visages) et peuvent servir de manière fiable à discriminer la classe de stimuli qui a été présentée au participant. Ces caractéristiques des spectres de puissance des images de classification obtenues par l'échantillonnage temporel aléatoire suggèrent qu'une divergence en fonction de l'âge pourrait révéler des différences liées au vieillissement dans les mécanismes oscillatoires en jeu.

La présente étude se veut intégrative de tous les aspects présentés ci-haut. Les deux groupes de participants (jeunes adultes et personnes âgées) exécuteront une tâche de reconnaissance d'objets communs afin de déterminer si les caractéristiques temporelles du traitement visuel diffèrent entre les groupes. Grâce à cette technique, il sera possible de déterminer si le vieillissement sain a un effet sur les mécanismes visuels oscillatoires impliqués dans la réalisation de la tâche. Ce projet constitue une première étape dans une démarche de plus grande ampleur visant éventuellement à caractériser les perturbations de ces mécanismes oscillatoires dans le contexte de maladies neurodégénératives et à évaluer la capacité de ces mécanismes à fournir une indication précoce du développement futur de telles maladies sur une base individuelle. En effet, différentes études ont trouvé des anomalies au niveau de l'activité oscillatoire chez des personnes âgées avec un TCL et/ou une MA et/ou une maladie de Parkinson avec démence (e.g. Babiloni et al., 2015; Babiloni et al., 2018; Fonseca et al., 2013; Schmiedt-Fehr et al., 2016). Dans leur étude auprès d'individus ayant un TCL, Emek-Savas et al. (2016) ont pu démontrer que le groupe TCL a une activité frontale dans la bande delta dont l'amplitude

est inférieure à celle du groupe contrôle et que celle-ci est corrélée positivement au volume de cette région corticale. Un suivi d'un an après l'évaluation initiale révèle que les individus avec un TCL dont l'état s'est détérioré ont une réduction de l'activité delta comparativement aux individus avec un TCL stable, suggérant une possible conversion en MA.

Chapitre 3 – Hypothèse

Sachant que les oscillations neuronales semblent altérées dans le vieillissement sain et que le paradigme d'échantillonnage temporel offre une mesure des effets comportementaux de ces oscillations, il est attendu que les résultats obtenus chez les personnes âgées seront différents de ceux du groupe des jeunes adultes. L'effet le plus attendu concerne les spectres de puissance des images de classification individuelles, qui semblent être les indicateurs les plus fiables des mécanismes oscillatoires mis en jeu par une tâche cognitive. Il est donc prédit que les spectres de puissance du groupe de personnes âgées diffèreront significativement du groupe contrôle (jeunes adultes). L'état des connaissances actuel ne permet toutefois pas de spécifier comment ces différences vont se manifester. Par ailleurs, il n'est pas exclu que les images de classifications elles-mêmes ou encore leurs spectres de phase diffèrent entre les participants jeunes et âgés; ce que nous examinerons également.

Chapitre 4 : Méthodologie

Participants

32 participants, divisés en deux groupes de 16, soit des jeunes adultes (18 - 35 ans) et des personnes âgées entre 60 et 85 ans, dont la vision est normale ou corrigée (20/20) et avec le français comme langue maternelle ont pris part à cette étude. Tous les participants ont signé un consentement et ont reçu une compensation financière de 30\$ pour leur participation. L'étude a été approuvée par le comité d'éthique de la recherche en vieillissement et imagerie du CIUSS du Centre-Sud de Montréal. Cette approbation a été reconnue par le Comité d'Éthique de la Recherche en Éducation et Psychologie (CÉREP) de l'Université de Montréal.

Pour le groupe de jeunes adultes, les participants ne devaient présenter aucun trouble neurologique et/ou psychiatrique. Au final, 10 femmes et 6 hommes composaient ce groupe. La moyenne d'âge était de 24,1 ans et un seul participant était gaucher. Ils ont été recrutés via les médias sociaux (Facebook) et par le bouche-à-oreille. Pour le groupe de personne âgées, les participants devaient rapporter avoir un fonctionnement cognitif normal. 12 femmes et 4 hommes formaient ce groupe, la moyenne d'âge était de 72,75 ans et un seul participant était gaucher. Les participants âgés ont été recruté principalement via la banque de participants du Centre de Recherche de l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal (CRIUGM) et par le bouche-à-oreille.

Stimuli

Les stimuli sont 256 images d'objets familiers tirées de la *Bank of Standardized Stimuli* (BOSS). Celles-ci ont été sélectionnées sur la base des normes recueillies auprès de participants francophones (Brodeur et al., 2012) avec l'objectif de maximiser la facilité à en trouver le nom, tel qu'indiqué par les statistiques disponibles. 240 images ont été utilisées pour les blocs

expérimentaux (au nombre de 5) et 16 images ont été utilisées pour le bloc pratique. Les images d'objets ont été présentées en niveaux de gris sur un fond blanc dans un cadre de 640 x 640 pixels. À l'intérieur de ce cadre, la taille maximale des objets était de 17,4° d'angle visuel horizontalement et de 17,1° d'angle visuel verticalement, et la taille minimale des objets était de 2,6° d'angle visuel horizontalement et de 3,3° d'angle visuel verticalement.



Figure 4. Exemples d'images utilisées pour l'étude tirées de la Bank of Standardized Stimuli (BOSS).

Matériel

Les stimuli étaient présentés sur un écran Lenovo ThinkStation P52030BE à un taux de rafraîchissement de 120 Hz. L'écran a été calibré pour permettre une manipulation linéaire de la luminosité. La table de luminance corrigée contenait 235 valeurs allant de 1 à 322 lux. La distance d'observation était approximativement de 57 cm. La position de la tête des participants n'était pas fixée par une mentonnière ou autre dispositif. Cela permettait aux participants d'être plus confortables durant la totalité de l'expérience. Le programme expérimental est écrit en Matlab et fait usage de fonctions de la « Psychophysics Toolbox » (Kleiner et al., 2007).

Procédure

À chaque essai, les participants devaient nommer à voix haute l'objet présenté. L'expérimentateur inscrivait ensuite leur réponse par le biais du clavier de l'ordinateur. La variable dépendante mesurée était l'aspect correct/incorrect des réponses des participants. Pour chaque participant, l'expérience comportait un total de 1200 essais expérimentaux répartis en

cinq blocs. Pour les essais expérimentaux, 240 images ont été utilisées et ont été présentées à une seule reprise dans chacun des cinq blocs expérimentaux. Avant les blocs expérimentaux, un bloc pratique de 16 essais a été administré. Pour les blocs expérimentaux et pratique, les stimuli étaient présentés dans un ordre aléatoire différent pour chaque participant.

Les images des stimuli étaient présentées pendant 200 ms et du bruit blanc visuel leur était superposé. Le contraste de la cible (le signal) a été ajusté de manière à maintenir le taux de réponses correctes aux environs de 50%. La plage de bruit blanc constitue la composante « bruit » du stimulus et son contraste était maximal. Au début de l'expérience, le contraste de l'image de la cible était à 40% de sa valeur originale. Puis, à partir du 11^e essai, si le participant avait une performance inférieure à 50% dans les 10 essais précédents, le contraste de la cible était diminué d'un pas. Au contraire, si cette performance était supérieure à 50%, le contraste de la cible était augmenté d'un pas. La valeur initiale du pas était de 16% et celle-ci diminuait de moitié à chaque fois que la modification du niveau de bruit changeait de direction, et ce jusqu'à l'atteinte d'une valeur de 1. L'état de l'algorithme à la fin d'un bloc expérimental était retenu pour être utilisé dès le début du bloc suivant. Les plages de bruit aléatoires utilisées étaient constantes pour un essai et variaient aléatoirement à travers les essais.

Le stimulus présenté à l'écran était construit par une combinaison linéaire de la cible (le signal) et d'une plage de bruit blanc aléatoire. Le rapport signal-bruit variait à travers la durée d'exposition selon une fonction d'échantillonnage créée par l'intégration d'ondes sinusoïdales de fréquence entre 5 et 55 Hz (par pas de 5 Hz) dont les amplitudes et les phases sont aléatoires. Le rapport signal-bruit était normalisé dans l'étendue 0 (seul le bruit visuel était visible) à 0,8 (le signal était obstrué partiellement par le bruit visuel) et une nouvelle fonction d'échantillonnage était générée à chaque essai. L'énergie de la stimulation était maintenue constante, c'est-à-dire

que toutes les images constituant la séquence présentée au cours d'un essai avaient un contraste RMS normalisé à 1. La Fig. 5 donne un aperçu de l'évolution de l'aspect du stimulus présenté à travers sa durée d'exposition (voir également <https://umontreal.ca.panopto.com/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=27f0b1cb-d288-423a-af08-aeb300b8a445> pour une vidéo d'une séquence d'essais). Étant donné la durée de 200 ms de la cible et la fréquence temporelle de 120 Hz offerte par l'écran de stimulation, chaque essai était constitué d'une séquence de 24 images.

Le déroulement de l'étude s'est fait en deux séances d'une durée d'environ une heure à une heure trente chacune, pouvant être dans la même journée ou sur deux journées différentes avec au maximum une semaine entre les deux séances. Le test de dépistage cognitif Cognistat (voir plus bas), le bloc pratique et deux blocs expérimentaux ont été administrés durant la première séance et les trois blocs expérimentaux restants à la deuxième séance. Chaque essai débutait avec une plage carrée de bruit visuel de 17,7 cm par 17,7 cm qui était présente durant 750 ms. Une croix de fixation apparaissait pendant 250 ms pour ensuite disparaître. Un délai de 150 ms avait lieu avant la présentation d'une tonalité de 900 Hz – 75 dB durant 50 ms. Suite à la tonalité, un délai de 100 ms suivait pour laisser place à l'image cible. L'image de la cible était superposée de bruit blanc visuel et le rapport signal/bruit variait selon la fonction d'échantillonnage établie pour cet essai sur une durée de 200 ms. Une fois l'image cible disparue, l'écran revenait au bruit blanc. Les participants pouvaient répondre sans pression temporelle et l'expérimentateur appuyait sur la touche « 1 » du clavier pour une bonne réponse et « 0 » pour une mauvaise réponse. Un son de 1000 Hz durant 100 ms était émis pour les bonnes réponses et un son de 300 Hz durant 300 ms était émis suite à une erreur.

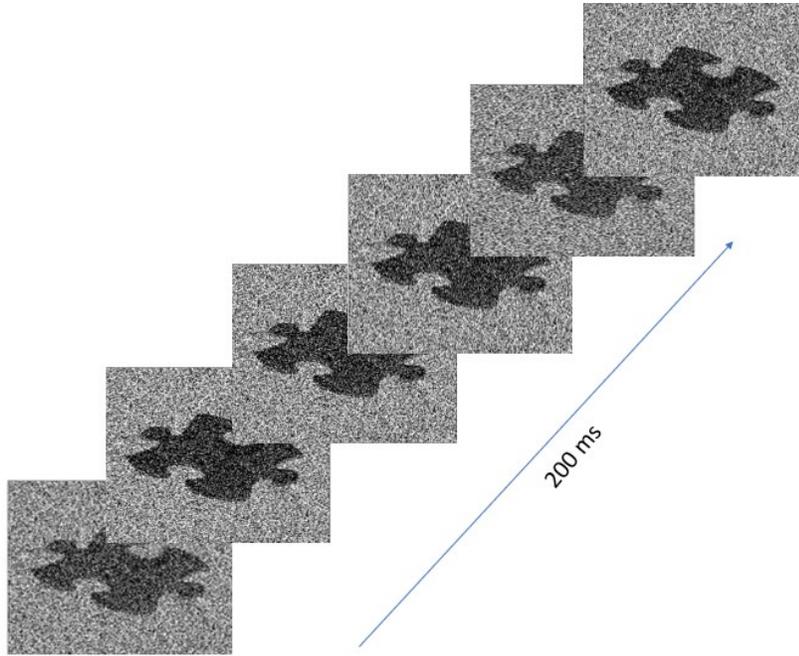
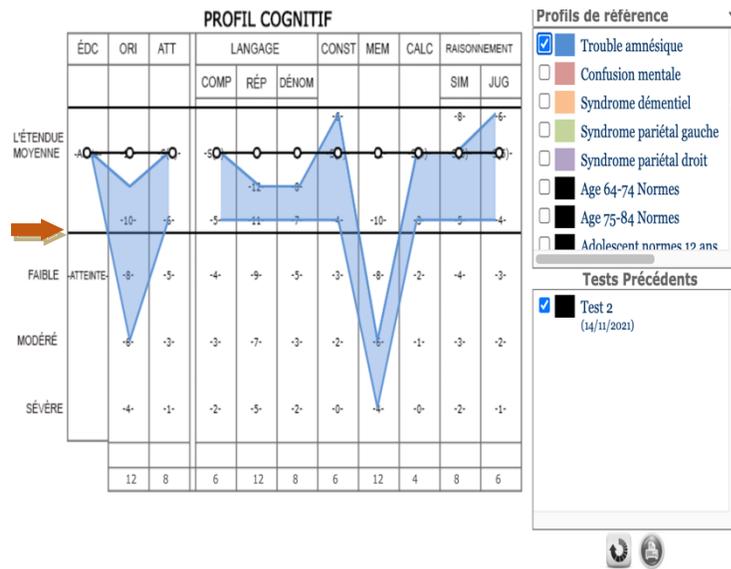


Figure 5. Exemple du déroulement d'un essai de cette étude

Durant la durée d'exposition de 200 ms de chaque image cible, il y a des oscillations aléatoires du rapport signal/bruit et à chaque essai un nouveau patron est créé.

Cognistat

Avant l'expérience elle-même, une brève évaluation cognitive était administrée avec le test de dépistage cognitif Cognistat (Arguin et al., 2020; Kiernan et al., 1987), dont la durée d'administration est d'environ 20 minutes. L'évaluation des fonctions cognitives avec Cognistat permet de faire un survol des principaux facteurs médicaux du participants qui pouvaient avoir un impact sur leur performance cognitive. Les fonctions cognitives évaluées par Cognistat étaient l'attention, le langage, les praxies constructives, le calcul, la mémoire ainsi que le raisonnement. Comme résultat, Cognistat offre un profil graphique des performances à travers les différents sous-tests qui est facilement compréhensible et signale clairement la présence de déficits le cas échéant (figure 6). L'évaluation des fonctions cognitives a été effectuée afin de s'assurer que les participants des deux groupes présentent des niveaux de fonctionnement cognitif comparable.



■ Trouble amnésique

Figure 6 - Exemple de profil graphique des performances offert par Cognistat une fois l'évaluation complétée.

La ligne noire pleine avec des cercles blancs correspond à une performance normale. Tout ce qui se retrouve en-dessous de la ligne horizontale noire marquée par une flèche reflète un déficit (faible, modéré, sévère). Tout ce qui est en haut de cette même ligne représente l'étendue moyenne des performances. La partie bleutée représente un profil qu'on peut retrouver dans un trouble amnésique (choisi ici à titre d'illustration; plusieurs profils typiques de troubles cognitifs fréquents sont disponibles).

Traitement des données et analyses statistiques

Pour chaque participant, la moyenne des fonctions d'échantillonnage associées aux réponses erronées était soustraite de celle associée aux réponses correctes. Le résultat de cette soustraction s'appelle une image de classification (IC) et reflète les variations dans l'efficacité du traitement perceptivo-cognitif du participant en fonction du temps. Cette efficacité de traitement constitue une mesure de la capacité du participant à utiliser l'information disponible afin d'en arriver à une réponse correcte. Celle-ci a été examinée en fonction de deux modes de représentation des fonctions d'échantillonnage temporel, soit (1) la fonction d'échantillonnage temporelle brute, tel que décrit plus haut, et (2) une représentation de la fonction

d'échantillonnage en termes des résultats d'une analyse temps-fréquence.¹ Les représentations temps-fréquence des fonctions signal/bruit ont été calculées à l'aide d'une analyse par des ondelettes de Morlet complexes de trois cycles qui variaient dans le domaine de la fréquence temporelle de 5 Hz à 55 Hz par bonds de 5 Hz. Pour ces deux modes de caractérisation des profils d'échantillonnage temporel, les valeurs associées aux mauvaises réponses étaient additionnées et pondérées pour ensuite être soustraites de la somme pondérée des données liées aux fonctions d'échantillonnage des bonnes réponses.

Les images de classification individuelles étaient ensuite transformées en scores-z avec une procédure de « bootstrapping ». Cette technique consiste à calculer la moyenne et l'écart-type d'une distribution des données s'il n'y avait aucune correspondance entre les performances et les fonctions d'échantillonnage à travers la production d'images de classification factices résultant d'une assignation aléatoire avec remplacement des fonctions d'échantillonnage aux réponses correctes versus les réponses erronées qui est répétée un grand nombre de fois (ici, 1000 itérations). La moyenne et l'écart-type des images de classification factices créées par cette procédure servent de référence pour transformer les données individuelles en scores-z. Cette transformation permet de représenter les données individuelles sur une échelle commune et ainsi, d'en faire la moyenne à travers les participants. Tous les tests statistiques appliqués sur les images de classification ont été faits avec le test Pixel (Chauvin & al., 2005). L'application du test Pixel dans le cas présent visait à identifier les points des images de classification qui se distinguaient significativement de zéro. En conséquence, le test appliqué est bidirectionnel et le seuil alpha est de 0,05.

¹ Une autre manière par laquelle il est possible de caractériser les fonctions d'échantillonnage est sous leurs paramètres de Fourier (i.e. spectres de phase et de puissance). Cependant, les études antérieures ainsi que la présente expérience ne démontrent aucun impact de ces facteurs sur l'efficacité de traitement visuel. Nous en avons donc omis la présentation ici pour le bénéfice de la concision.

Les tests appliqués pour les comparaisons inter-groupes des images de classification reposaient aussi sur une procédure de « bootstrapping », suivie par une application du test Pixel. Dans un premier temps, l'image de classification moyenne obtenue par un groupe était soustraite de celle obtenue par l'autre groupe. Cette image de classification différentielle était ensuite convertie en scores-z en utilisant une moyenne et un écart-type de référence établis sur la base de 1000 itérations d'une procédure de « bootstrapping » dans laquelle les images de classification factices étaient produites par l'assignation aléatoire avec remplacement des images de classification individuelles moyennes à un groupe ou l'autre. L'image de classification différentielle sur une échelle en scores-z ainsi obtenue était ensuite soumise au test Pixel afin d'en déterminer les portions qui diffèrent significativement entre les groupes ainsi que la direction de cette différence.

L'analyse des images de classification individuelle dans leurs composantes de phase et de puissance a été faite via une analyse de Fourier unidimensionnelle. Dans le cas des images de classification dans le domaine temps-fréquence, des analyses de Fourier indépendantes ont été appliquées sur chaque bande de fréquence oscillatoire du RSB (de 5 à 55 Hz, par pas de 5 Hz). Les spectres de puissance et de phase des images de classification individuelles ont ensuite été comparés entre les groupes avec une ANOVA.

Une analyse de consistance des images de classification à travers les participants a été exécutée avec le coefficient de corrélation intra groupe (CCI) (Shrout et Fleiss, 1979). Le CCI évalue la similarité entre les participants au niveau de leur patron de résultats. La limite supérieure du CCI est 1 alors qu'il n'y a pas de limite inférieure. Plus le CCI se rapproche de la valeur 1, plus les participants sont similaires entre eux dans leur patron de résultats. Cette analyse a été menée afin d'évaluer la similarité des images de classification obtenues par les différents

participants d'un même groupe. L'importance de cette démarche repose sur deux facteurs. D'une part, une similarité intra groupe élevée constitue un bon indicateur de la généralisabilité de nos résultats; autrement dit, à quel point les résultats d'un individu présentant certaines caractéristiques personnelles (e.g. jeune adulte) sont généralisables à d'autres individus similaires. D'autre part, quoique le test Pixel présente un grand intérêt pour le traitement statistique d'images de classification (Chauvin et al., 2005), celui-ci ne prend pas les différences individuelles en considération, contrairement à une analyse de variance par exemple. Le coefficient de corrélation intra groupe s'avère donc un complément important au test Pixel pour l'analyse des images de classification en nous donnant une indication de la validité avec laquelle les images de classification moyennes reflètent celles obtenue par les individus formant le groupe.

Des tests t à groupes indépendants ont été appliqués pour chaque sous-test de l'évaluation Cognistat afin de s'assurer que les deux groupes ne diffèrent pas significativement entre eux sur le plan des habiletés cognitives.

Chapitre 5 – Résultats

Informations générales

Le contraste des images pour maintenir une performance à 50% correcte pour le groupe de jeune adulte est de 0,51 (taux moyen de réponses correctes : 39,8%) alors que celui pour le groupe des personnes âgées est de 0,51 (taux moyen de réponses correctes : 39,9 %).

Sous-tests de Cognistat

Le tableau 1 montre les résultats aux tests t comparant les deux groupes pour chaque sous-test du Cognistat. Aucune comparaison ne signale un effet significatif, sauf pour les praxies ($t(30) = 2,52 ; p = 0,02$), pour lesquelles les participants âgés obtiennent une moyenne légèrement inférieure aux jeunes. Quoique significative, cette différence demeure faible et les fonctions cognitives en jeu dans le test des praxies sont assez différentes de celles impliquées dans la reconnaissance d'objets visuels. D'ailleurs, à cet égard, notons que le sous-test Dénomination implique justement la dénomination d'images d'objets courants et que les deux groupes y obtiennent des scores identiques. Il n'est donc pas attendu que la différence entre les groupes au sous-test Praxies ait un quelconque impact sur les résultats à la tâche expérimentale.

Tableau 1. Tests-T des sous-test du Cognistat

Sous-tests	T	ddl	Sig. (bilatéral)
Orientation	1,00	30	0,33
Attention	0,00	30	1,00
Praxies	2,52	30	0,02
Mémoire	0,94	30	0,36
Calcul	-1,38	30	0,18
Similitude (raisonnement)	0,00	30	1,00
Jugement (raisonnement)	1,02	30	0,32
Compréhension (langage)	1,38	30	0,18
Répétition (langage)	0,00	30	n.s.
Dénomination (langage)	0,00	30	n.s.

Images de classification temporelles

Les images de classification de la figure 7 présentent les variations de l'efficacité du traitement dans le domaine temporel pour les jeunes (7a) et les personnes âgées (7b). Le domaine temporel illustre l'efficacité du traitement des participants dans le temps à travers la durée de présentation de la cible. Les lignes pointillées sur les images représentent le seuil de signification pour le test Pixel. Les parties qui se trouvent entre les deux lignes ne diffèrent pas significativement de zéro, indiquant que l'efficacité du traitement est nulle. Les parties qui se situent en haut des lignes rouges représentent une efficacité de traitement significativement supérieure à 0 (i.e. niveau du hasard, tel que déterminé par la moyenne obtenue de la procédure de bootstrapping décrite plus haut). À ces moments donc, les participants étaient effectivement en mesure d'utiliser l'information disponible dans le stimulus pour bien identifier la cible. Au contraire, les parties se situant en-dessous des lignes rouges correspondent à des moments auxquels l'efficacité de traitement est significativement inférieure à 0. Autrement dit, l'information du stimulus disponible à ce moment nuisait à l'identification de la cible. Pour les jeunes adultes (7a), on peut voir qu'à l'apparition du stimulus et jusqu'à environ 25 ms ainsi que d'environ 40 ms à 90 ms, l'efficacité du traitement est inférieure à 0. D'environ 90 ms à 120 ms et de 130 ms à 180 ms, l'efficacité du traitement est supérieure à 0. Pour les personnes âgées (7b), de l'apparition du stimulus à environ 20 ms, de 125 ms à 130 ms et de 180 ms à 200 ms, l'efficacité du traitement est inférieure à 0. De 25 ms à environ 75 ms et d'environ 90 ms à 115 ms, l'efficacité du traitement est supérieure à 0.

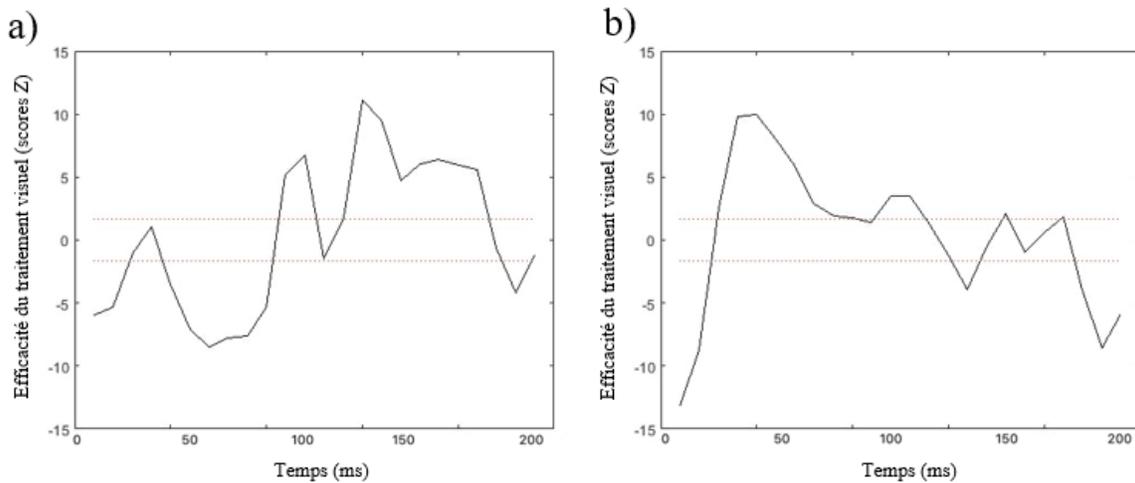


Figure 7. Image de classification temporelle de l'efficacité du traitement visuel en fonction du temps depuis l'apparition de la cible pour les jeunes adultes (a) et les personnes âgées (b).

La figure 8 présente le contraste de l'efficacité du traitement visuel entre les deux groupes (image de classification pour les personnes âgées soustraite de celle des jeunes adultes). Les parties en haut de la ligne pointillée rouge reflètent les moments où les jeunes adultes étaient meilleurs, alors que les parties en-dessous de la ligne pointillée rouge reflètent les moments où se sont les personnes âgées qui performaient mieux. Il est possible de constater ici la différence dans l'efficacité du traitement visuel à travers le temps selon le groupe d'âge. En effet, l'efficacité du traitement visuel des personnes âgées est à son meilleure en début de présentation (sauf pour les premières millisecondes, où ce sont les jeunes adultes qui performant mieux) du stimulus alors que l'efficacité du traitement visuel des jeunes adultes est meilleure en fin de présentation du stimulus.

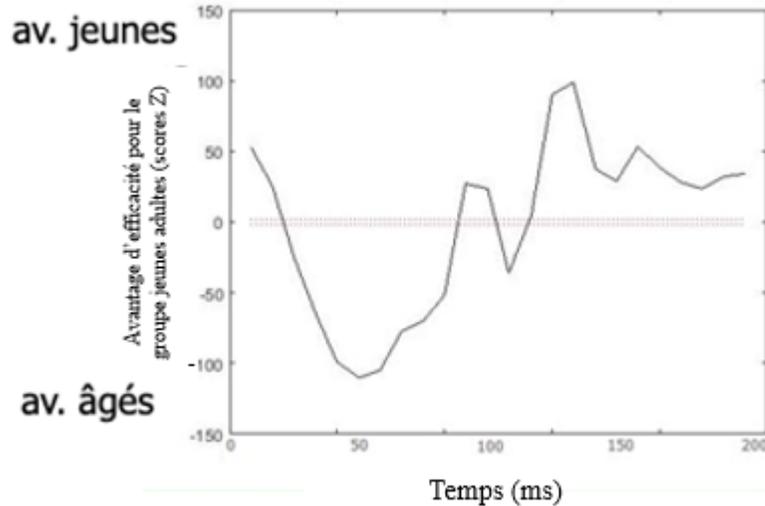


Figure 8. Contraste de l'efficacité du traitement visuel à travers le temps depuis l'apparition du stimulus entre les jeunes adultes et les personnes âgées

Les spectres de phase et de puissance des images de classification temporelles (Fig. 9) ont été examinés afin de voir s'ils offrent des patrons distincts selon le groupe (jeunes adultes et personnes âgées). Une ANOVA mixte des spectres de phase avec la fréquence dans l'image de classification et le groupe comme facteurs révèle un effet principal de la fréquence ($F(12, 360) = 4,90 ; p = 0,00$) et une interaction significative entre les deux facteurs (groupe X fréquence dans l'IC) ($F(12, 360) = 1,92 ; p = 0,03$). L'effet principal de groupe n'est pas significatif ($F(1, 30) = 0,01 ; p = 0,94$). Ces résultats signifient que les patterns de spectres de phase des images de classification temporelles diffèrent significativement entre les jeunes adultes et les personnes âgées. On note en particulier des différences de phase marquées aux fréquences de 5, 10, 25, et 45-55 Hz dans les images de classification (Fig. 9b).

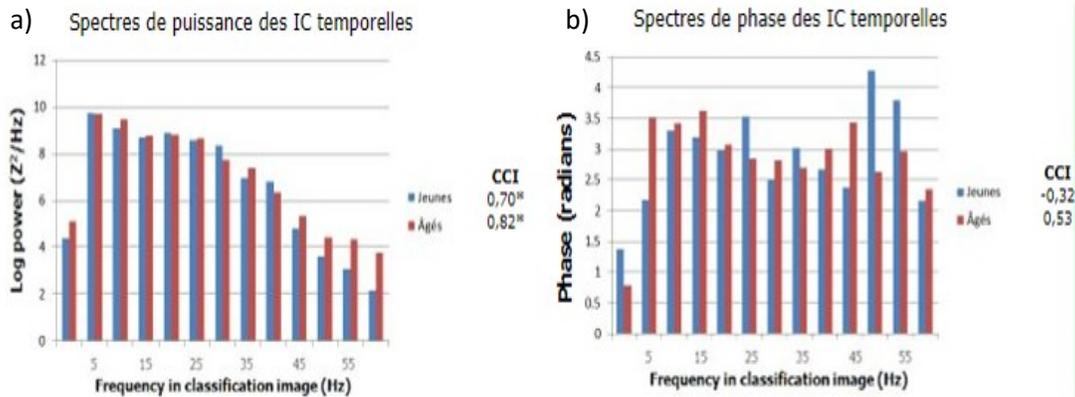


Figure 9. Spectres de puissance et de phase des ICs temporelles. Les spectres de puissance semblent similaires entre les groupes alors que les spectres de phase diffèrent entre les groupes

Une ANOVA mixte a aussi été effectuée pour les spectres de puissance des images de classification temporelles avec les mêmes facteurs (fréquence dans l'image de classification X groupe). Les résultats indiquent un effet principal du spectre de puissance ($F(12, 360) = 93 ; p = 0,00$), mais aucune interaction significative entre les deux facteurs (groupe X fréquence de l'IC) ($F(12, 360) = 1,72 ; p = 0,62$). L'effet principal de groupe n'est pas significatif ($F(1, 30) = 1,59 ; p = 0,22$). Ces résultats signifient que les spectres de puissance des images de classification temporelle ne diffèrent pas significativement entre les jeunes adultes et les personnes âgées.

Images de classification temps-fréquence

Les images de classification de la figure 10 présentent les variations de l'efficacité du traitement visuel dans le domaine temps-fréquence pour les jeunes (10a) et les personnes âgées (10b). Le domaine temps-fréquence illustre l'efficacité du traitement en fonction des fréquences oscillatoires du RSB à travers le temps. Les points de couleurs chaudes sont associés à des valeurs positives d'efficacité du traitement de l'information. Pour ces points, les participants pouvaient utiliser l'information du stimulus de façon à bien identifier la cible. Les points de couleurs froides sont associés à des valeurs négatives d'efficacité du traitement de l'information.

Pour ces points, l'information du stimulus présente nuisait à la bonne reconnaissance de la cible. Les points en blanc indiquent des combinaisons de temps et de fréquences oscillatoires auxquelles l'efficacité du traitement ne différait pas significativement de 0. Pour les jeunes adultes, de l'apparition du stimulus à environ 90 ms, les fréquences RSB allant de 15 Hz à 50 Hz favorisaient l'encodage visuel, avec un traitement optimal pour les fréquences se situant entre 20 Hz et 40 Hz environ. D'environ 120 ms à 130 ms, les fréquences RSB se situant entre 30 Hz et 55 Hz nuisaient à l'encodage visuel des jeunes adultes. Finalement, d'environ 140 ms à 200 ms, les fréquences RSB de 15 Hz à 45 Hz étaient liées à une meilleure efficacité de traitement visuel. Pour les personnes âgées, de l'apparition du stimulus à environ 30 ms, deux intervalles de fréquence RSB semblaient nuire à l'encodage visuel : entre 15 Hz et 40 Hz et entre 45 Hz et 55 Hz. De 30 ms à 115 ms, les fréquences RSB se situant entre 5 Hz et 30 Hz permettaient un bon encodage visuel, avec un traitement optimal pour les fréquences allant de 5 Hz à 20 Hz. D'environ 120 ms à 130 ms, les fréquences RSB entre 30 Hz et 55 Hz nuisaient à l'encodage visuel. De 130 ms à 170 ms, les fréquences RSB se situant entre 20 Hz et 55 Hz favorisaient l'encodage visuel, avec un pic entre environ 35 Hz et 50 Hz. Finalement, en fin de stimulation (entre 190 ms et 200 ms), les fréquences RSB entre 35 Hz et 55 Hz nuisaient à l'encodage visuel.

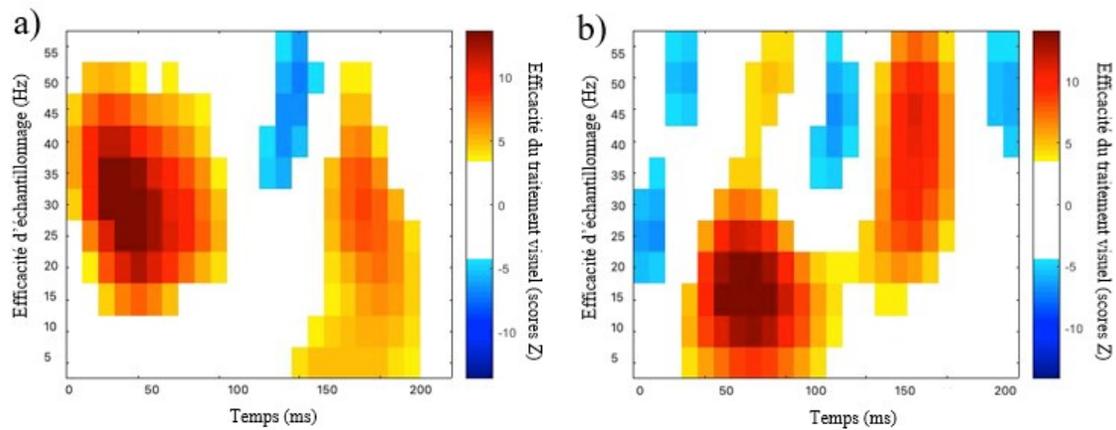


Figure 10. Images de classification dans le domaine temps-fréquence de l'efficacité du traitement visuel en fonction des fréquences RSB à travers le temps pour les jeunes adultes (a) et les personnes âgées (b).

La figure 11 présente le contraste de l'efficacité du traitement visuel entre les deux groupes (image de classification pour les personnes âgées soustraite de celle des jeunes adultes). Les points associés aux couleurs chaudes représentent le moment ainsi que les fréquences où les jeunes adultes performant mieux. Les points associés aux couleurs froides, quant à eux, représentent les moments et les fréquences où les personnes âgées sont meilleures. Il est possible de constater qu'entre l'apparition du stimulus et jusqu'à environ 50 ms, les fréquences RSB allant de 17 Hz à 50 Hz favorisaient l'encodage visuel chez les jeunes adultes. Pour l'intervalle de temps allant de 40 ms à 90 ms, les personnes âgées bénéficiaient davantage de l'information visuelle pour les fréquences RSB se situant entre 5 Hz et 20 Hz. D'environ 120 ms à 140 ms, les fréquences RSB entre 37 Hz et 55 Hz favorisaient l'encodage visuel des personnes âgées, alors que de 160 ms à 200 ms, les fréquences entre 7 Hz et 27 Hz favorisaient l'encodage visuel des jeunes adultes.

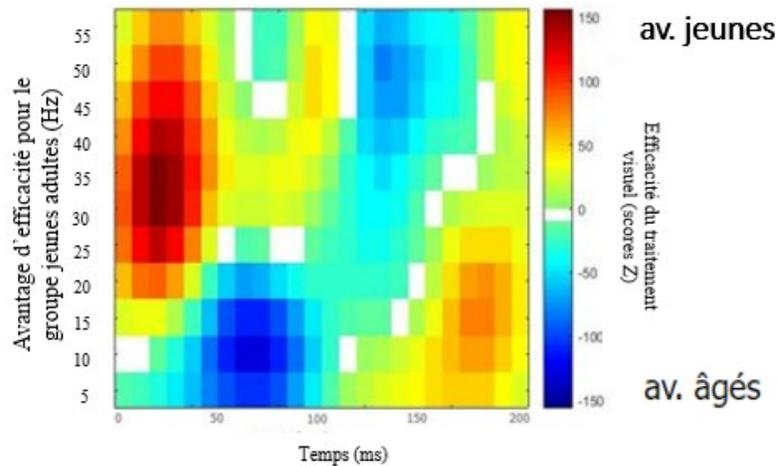


Figure 11. Contraste de l'efficacité du traitement visuel en fonction des fréquences RSB à travers le temps depuis l'apparition du stimulus entre les jeunes adultes et les personnes âgées.

Les spectres de phase et de puissance des images de classification temps-fréquence ont été examinés (Fig. 12) afin de voir s'ils offrent des patrons distincts selon le groupe (jeunes adultes et personnes âgées). Une ANOVA mixte avec la fréquence dans l'image de classification X la fréquence d'oscillation RSB X groupe révèlent un effet principal de la fréquence dans l'IC ($F(12, 360) = 2,44 ; p = 0,01$), une interaction significative entre le groupe et la fréquence IC ($F(12, 360) = 2,11 ; p = 0,02$) et un effet d'interaction de la fréquence IC et de la fréquence d'oscillation RSB ($F(120, 3600) = 3,68 ; p = 0,00$). Les autres effets n'atteignent pas le seuil de signification ($p = 0,33 ; 0,20 ; 0,99$) et ne seront donc pas abordés. Ces résultats signifient que les spectres de phase des images de classification temps-fréquence diffèrent significativement entre les jeunes adultes et les personnes âgées. Ces différences sont particulièrement marquées pour les fréquences d'oscillations RSB les plus élevées, soient de 45 à 55 Hz.

Une ANOVA mixte a aussi été effectuée pour les spectres de puissance des images de classification temps-fréquence avec les mêmes facteurs (fréquence dans l'image de classification X fréquence d'oscillation RSB X groupe). Les résultats montrent un effet principal de fréquence

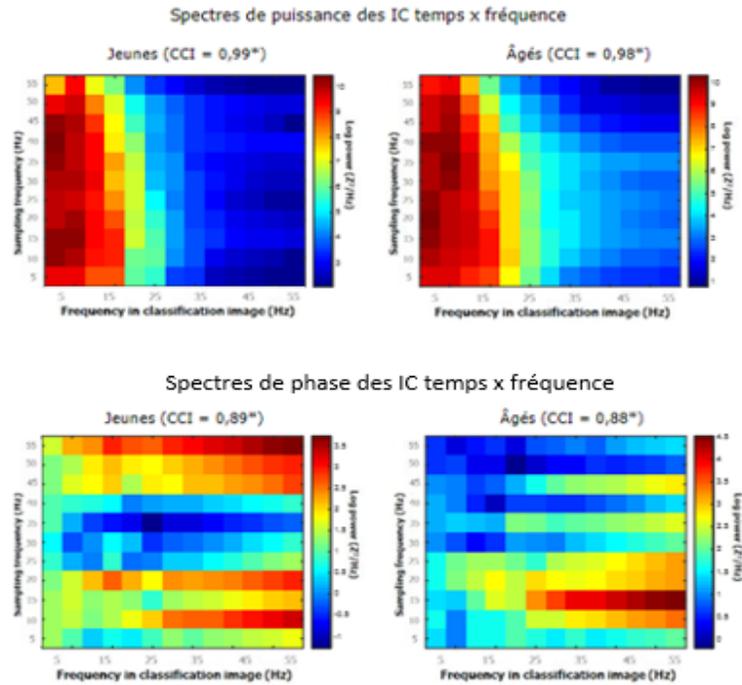


Figure 12. Spectres de puissance et de phase des ICs temps-fréquence. Les spectres de puissance semblent similaires entre les groupes alors que les spectres de phase diffèrent entre les groupes.

IC ($F(12, 360) = 302 ; p = 0,00$), un effet de la fréquence d'oscillation RSB ($F(10, 300) = 409 ; p = 0,00$) et une interaction significative entre la fréquence IC et les fréquences d'oscillations RSB ($F(120, 3600) = 2,31 ; p = 0,00$). Les autres effets n'atteignent pas le seuil de signification ($p = 0,99 ; 0,91 ; 1,00$) et ne seront donc pas abordés. Comme cette dernière analyse ne démontre aucun effet impliquant le facteur Groupe, ces résultats indiquent que les spectres de puissance ne diffèrent pas significativement entre les jeunes adultes et les personnes âgées.

Cohérence intra-groupe

La similarité des images de classification individuelles et des spectres de puissance et de phase de ces dernières à travers l'ensemble des participants de chaque groupe a été examinée à l'aide du coefficient de cohérence intra-classe (CCI). La cohérence intra-groupe permet de vérifier à quel point les résultats obtenus sont généralisables à d'autres ensemble de participants.

La valeur maximale que peut prendre le CCI est de 1 et la valeur minimale n'a pas de limite. Plus la valeur du CCI est élevée, plus cela signifie que les résultats d'un participant sont un bon indicateur des résultats d'un autre participant ; les résultats présentent donc un bon potentiel de généralisation.

Tableau 2. Coefficients de corrélation intra-groupe

Coefficients de corrélation intra-groupe (CCI)	Jeunes adultes	Personnes âgées
Images de classification temporelles	-36.7	-27.5
Spectre de puissance des images de classification temporelle	0.70*	0.82*
Spectre de phase des images de classification temporelle	-0.32	0.53
Image de classification temps-fréquence	0.99*	0.98*
Spectre de puissance des images de classification temps-fréquence	0.98*	0.98*
Spectre de phase des images de classification temps-fréquence	0.89*	0.88*

* : significatif avec $p < .001$

Le tableau 2 résume les CCI des deux groupes à l'étude. Les CCI des images de classification temporelles brutes pour les jeunes adultes et les personnes âgées sont de -36,7 et -27,5, respectivement, et ceux-ci n'atteignent pas le seuil de signification. Les images de classification temporelle brutes ne semblent donc pas particulièrement généralisables d'un participant à l'autre. Les CCI pour les spectres de puissance des images de classification temporelles sont assez élevés ($p < 0,001$), alors que les CCI des spectres de phase des images de classification temporelles sont plus faibles et n'atteignent pas le seuil de significativité. Les spectres de puissance semblent donc être plutôt similaires à travers les participants, suggérant

alors qu'ils reflètent mieux un processus fondamental partagé entre les individus, ce qui n'est pas le cas pour les spectres de phase.

Dans le domaine temps-fréquence, les CCI des images de classification brutes sont de ,988 pour les jeunes adultes et de ,980 pour les personnes âgées ($p < 0,001$). Les CCI des spectres de puissance et de phase des IC sont très élevés ($p < 0,001$). C'est donc dire que les images de classification temps-fréquence ainsi que leurs spectres de phase et de puissance sont à toutes fins pratiques identiques à travers les participants. Les résultats obtenus pour un participant constituent donc une excellente estimation des résultats d'un autre participant du même groupe. Les résultats des CCI obtenus pour les images de classification temps-fréquence et leurs spectres de phase ajoutent donc le poids d'une excellente généralisabilité aux différences qu'ils présentent entre les participants jeunes et âgés. En bref, les images de classification temps-fréquence semblent refléter des processus de traitement perceptifs fondamentaux qui sont partagés de manière universelle.

Chapitre 6 – Discussion

L'étude rapportée ici avait pour but de caractériser le traitement visuel à travers le temps dans le vieillissement sain. Pour ce faire, deux groupes (jeunes adultes et individus âgés) avaient pour tâche de reconnaître des images achromatiques d'objets communs présentées sur un écran d'ordinateur. À l'aide de la technique d'échantillonnage temporel, des images de classification ont été obtenues, révélant ainsi les mécanismes oscillatoires en jeu pour la réalisation de la tâche de reconnaissance. Les IC ont été analysées dans le domaine temporel et dans le domaine temps-fréquence. De ce fait, il est possible de voir la variation de l'efficacité du traitement durant toute la durée de présentation du stimulus, mais aussi en fonction des différentes bandes de fréquence d'oscillation du RSB. À notre connaissance, cette étude est la première à investiguer le traitement visuel dans le vieillissement sain via la technique d'échantillonnage temporel aléatoire.

Les résultats obtenus révèlent, de façon globale, des variations notables de l'efficacité du traitement visuel à travers le temps pour les deux groupes (jeunes adultes et personnes âgées). C'est donc dire que l'efficacité perceptive des participants n'était pas constante à travers le temps et qu'elle peut connaître des ratés. Cette notion est en accord avec l'hypothèse, étudiée déjà depuis longtemps, que la perception est discrète plutôt que continue (Busch et al., 2009; Busch et VanRullen, 2010; Latour, 1967; Mathewson et al., 2012). Les résultats de cette étude vont dans le même sens, puisque qu'il est possible de remarquer qu'à certains moments, l'efficacité des participants (jeunes ou âgés) est meilleure qu'à d'autres moments.

Les résultats ont aussi mis de l'avant que le contenu fréquentiel des oscillations RSB semble affecter l'efficacité du traitement visuel à travers le temps. En d'autres mots, les

oscillations signal/bruit impactent d'une certaine manière les mécanismes visuels sous-tendant le traitement perceptif des participants. L'explication exacte de ce phénomène n'est pas encore claire. En effet, il n'est pas possible de conclure si une correspondance, ou bien une différence, entre les oscillations signal/bruit et les oscillations neuronales constitue le facteur important ou s'il s'agit d'une relation plus complexe. Pour pallier ce problème, il faudra mettre en correspondance les données d'échantillonnage temporel avec un enregistrement de l'activité cérébrale oscillatoire. À cette fin, une étude est actuellement en cours, combinant EEG et échantillonnage temporel pour une tâche de reconnaissance d'objets communs.

Les images de classification temporelles et temps-fréquence obtenues dans cette étude mettent en évidence des différences significatives entre les jeunes adultes et les personnes âgées de l'échantillon. En effet, les images de classification temporelles révèlent que les personnes âgées ont une meilleure efficacité de traitement visuel en début de présentation du stimulus (sauf pour les toutes premières millisecondes où les jeunes adultes semblent mieux performer) alors que les jeunes adultes performant mieux en fin de présentation du stimulus. Les images de classification temporelles ont aussi été décomposées dans leurs spectres de phase et de puissance.

Les analyses des spectres de phase des IC temporelles indiquent un effet principal de la fréquence temporelle dans les images de classification. La phase d'une onde réfère à la chronologie de cette même onde, donc son alignement dans le temps. Selon les résultats, l'alignement de phase varie à travers les différentes fréquences extraites des images de classification par l'analyse de Fourier. Les résultats montrent aussi une interaction entre la fréquence dans l'IC et le groupe pour ces spectres de phase. Ceci implique que la chronologie de l'engagement des mécanismes oscillatoires diffère à travers les groupes.

Pour les spectres de puissance des IC temporelles, un effet principal de la fréquence dans l'IC a été trouvé. La puissance d'une onde fait référence à l'amplitude, ou la force, avec laquelle une fréquence donnée contribue aux oscillations qui sont analysées. Dans le présent contexte, nous considérons que le spectre de puissance des IC reflète le niveau d'engagement des mécanismes oscillatoires qui sont impliqués dans la réalisation de la tâche. Ce résultat implique donc un niveau d'engagement (i.e. la puissance) distinct des mécanismes oscillatoires de différentes fréquences. Les résultats ne révèlent toutefois pas de différence significative entre les groupes sur les spectres de puissance. Selon ces résultats, les niveaux d'engagement des différents mécanismes oscillatoires impliqués dans la réalisation de la tâche seraient les mêmes à travers les groupes.

Les images de classification temps-fréquence montrent aussi des différences significatives entre les jeunes adultes et les personnes âgées. Par exemple, de l'apparition du stimulus jusqu'à environ 100 millisecondes plus tard, l'efficacité du traitement visuel pour les jeunes adultes est meilleure pour les fréquences d'oscillations RSB plus hautes (i.e. 25 à 55 Hz) alors que pour le même intervalle de temps, l'efficacité du traitement visuel des individus âgés est meilleure avec les basses fréquences (i.e. 5 à 20 Hz). Ce patron d'activité cérébrale oscillatoire semble s'inverser pour la fin de la présentation du stimulus. Effectivement, pour l'intervalle de temps allant d'environ 100 ms à 200 ms, l'efficacité du traitement pour le groupe de jeunes adultes est meilleure pour les fréquences plus basses (i.e. 5 à 25 Hz), alors que l'efficacité du traitement pour les personnes âgées est meilleure avec les hautes fréquences (i.e. 35 à 55 Hz).

Les spectres de phase et de puissance des images de classification temps-fréquence ont aussi été analysés à l'aide d'ANOVAs. Les résultats mettent de l'avant une interaction entre la fréquence dans l'IC et la fréquence oscillatoire RSB pour les spectres de phase. Ainsi, des

spectres de phase différents ont été observés à travers les fréquences d'oscillations RSB analysées dans cette étude (5 à 55 Hz). De plus, une interaction significative entre le groupe et la fréquence IC a aussi été trouvée. Tout comme c'était le cas pour l'interaction fréquence IC x groupe pour les spectres de phase des IC temporelles discutée plus haut, ce résultat implique que la chronologie de l'engagement des mécanismes oscillatoires semble différer selon le groupe. Les analyses portant sur les spectres de puissance des IC temps-fréquence révèlent d'abord un effet principal de fréquence dans l'IC. Cela veut dire que la puissance (i.e. le niveau d'engagement des mécanismes oscillatoires; voir plus haut) varie selon leur fréquence. Un deuxième résultat important démontre un effet principal de la fréquence oscillatoire du stimulus (i.e. la fréquence RSB). La fréquence oscillatoire dans le stimulus a donc elle aussi un impact important sur l'efficacité du traitement perceptif dans la tâche de reconnaissance d'objets. Finalement, les analyses révèlent une interaction significative entre la fréquence dans l'IC et la fréquence oscillatoire RSB. Cela veut dire que les spectres de puissance (i.e. le niveau d'engagement des mécanismes oscillatoires) diffèrent en fonction de la fréquence d'oscillation présente dans le stimulus. Pareil aux images de classification temporelles, aucune différence significative n'a été observée entre les groupes quant aux spectres de puissance dans les IC temps-fréquence.

L'analyse des coefficients de corrélation intra-groupe (CCI) qui a été faite permet de vérifier à quel point des individus d'un même groupe ont des patrons de résultats semblables. En d'autres mots, à quel point les résultats d'un participant d'un groupe peuvent prédire ceux d'un autre membre du groupe. Les CCI ont été calculés car les images de classification moyennes peuvent ne pas constituer un reflet valide des images de classification individuelles et le test Pixel qui est utilisé dans cette étude ne tient pas compte des différences individuelles dans le groupe dont l'image de classification moyenne est analysée. Bien que les ANOVAs effectuées sur les

spectres de phase et de puissance des IC tiennent compte de ces différences individuelles (à travers la variance d'erreur), les résultats des CCI peuvent freiner notre enthousiasme quant à l'interprétation de ces analyses (advenant un CCI faible ou négatif) ou, au contraire, ajouter une plus-value dans les cas de CCI élevés.

Les CCI des images de classification temporelles révèlent en effet que les ICs moyennes ne semblent pas refléter les ICs des individus constituant les groupes à l'étude. Leurs valeurs sont en effet très basses (jeunes adultes : -36,7 ; personnes âgées : -27,5). Les résultats vont dans le même sens pour les spectres de phase (jeunes adultes : -0,32 ; personnes âgées : 0,53). Bien que le CCI pour le groupe de personnes âgées soit moyennement élevé, il n'atteint toutefois pas le seuil de significativité. Seuls les spectres de puissance des images de classification temporelles ont un CCI élevé et significatif. C'est donc dire que les spectres de puissance des images de classification temporelles semblent être assez similaires entre les individus d'un même groupe. Ces observations répliquent celles rapportées par Arguin et al. (2021) et suggèrent que les différences individuelles des IC temporelles sont attribuables à des variabilités inter-sujets quant à la chronologie de l'engagement des mécanismes oscillatoires impliqués dans la tâche alors que le niveau d'engagement de ces mécanismes de différentes fréquences est hautement répliquables d'un individu à l'autre.

La valeur très élevée des CCI des images de classification temps-fréquence (jeunes adultes : 0,99 ; personnes âgées : 0,98) montrent que les ICs moyennes constituent un reflet valide des ICs des individus composant un groupe. Les CCI des spectres de phase et de puissance vont aussi dans ce sens, avec des valeurs très élevées et significatives. Il est donc possible de conclure que les images de classification temps-fréquence ainsi que leurs spectres de phase et de puissance sont plus aptes pour caractériser les oscillations cérébrales impliquées dans

la tâche de reconnaissance d'objets étant donné qu'ils sont très largement partagés d'un individu à l'autre. Les résultats de cette étude permettent de conclure à l'existence de différences significatives entre les jeunes adultes et les personnes âgées dans les mécanismes oscillatoires en jeu lors de la tâche de reconnaissance d'objets. Spécifiquement, ces différences concernent la chronologie de l'engagement des mécanismes oscillatoires impliqués dans la tâche, tel que révélé par les différences inter-groupes sur les spectres de phase des IC. Il semble donc que l'alignement temporel des mécanismes oscillatoires soit différent selon que l'on soit un jeune adulte ou une personne plus âgée. Par contre, les résultats indiquent que le niveau d'engagement de ces-mêmes mécanismes oscillatoires semble être similaire entre les groupes.

À notre connaissance, cette étude est la première à comparer l'efficacité du traitement visuel entre des jeunes adultes et des personnes âgées dans le contexte de la méthode d'échantillonnage temporel. Ceci implique donc une certaine difficulté pour la comparaison de nos résultats à ceux d'autres études. Soulignons toutefois que plusieurs autres études en sont venues à conclure à des différences en fonction de l'âge dans les mécanismes oscillatoires en jeu dans la réalisation de différentes tâches cognitives. Par exemple, dans une tâche de mémoire de travail et de reconnaissance de mots et d'objets, des différences significatives ont été trouvées entre les jeunes adultes et les personnes âgées au niveau des composantes PREs (Allen et al., 2020). Les auteurs concluent que les jeunes adultes et les personnes âgées semblent engager des mécanismes neuronaux différents durant la tâche de reconnaissance (Allen et al., 2020). Sebastian et al. (2011) en sont venus à la même conclusion à partir d'une tâche de stéréognosie, et ce même si les deux groupes (jeunes adultes et personnes âgées) avaient des latences et des taux de bonnes réponses semblables. En effet, l'activité neuronale des deux groupes, mesurée par les PREs, comportait des différences significatives. Les résultats de la présente expérience sont

donc en accord avec ces études antérieures, mais ajoutent une précision quant à l'origine des différences. En effet, selon les présents résultats, il semble que ce soient les mêmes mécanismes oscillatoires qui sont mis en jeu chez les jeunes adultes et les individus âgés mais qu'il y aurait une différence quant à la chronologie de leur engagement dans la tâche de reconnaissance.

La présente étude s'est concentrée sur les résultats obtenus dans une tâche de reconnaissance d'objets familiers. Toutefois, il serait important et intéressant de voir si des différences inter-groupes de même nature se manifestent dans le contexte d'autres tâches visuelles. En effet, le vieillissement semble affecter plusieurs aspects du fonctionnement visuel et non seulement la reconnaissance d'objets. Une étude est d'ailleurs en cours, avec le même protocole, mais cette fois-ci avec une tâche de reconnaissance de mots écrits. Il sera alors intéressant de comparer les résultats de cette étude à ceux que nous avons rapportés dans le présent mémoire.

Chapitre 7 – Conclusions

L'objectif de ce mémoire était d'investiguer les caractéristiques temporelles du traitement visuel dans le vieillissement sain. Les résultats ont permis de mettre de l'avant des différences significatives dans les images de classification temporelles et temps-fréquence des deux groupes à l'étude (jeunes adultes et personnes âgées). Ce sont les images de classification temps-fréquence ainsi que leurs spectres de phase et de puissance qui permettent le mieux de caractériser les oscillations cérébrales en jeu durant une tâche de reconnaissance d'objets et de différencier les groupes à l'étude. Les résultats de cette étude ont permis de démontrer que les mécanismes oscillatoires des personnes âgées en jeu dans une tâche perceptive diffèrent de ceux des jeunes adultes sur le plan de leur chronologie (i.e. spectres de phase). Ces résultats sont en accord avec d'autres études qui soulignent des différences des mécanismes oscillatoires en fonction de l'âge. Par contre, la présente étude ajoute une précision aux résultats déjà présents ; les différences dans les mécanismes cérébraux oscillatoires semblent se situer principalement dans la chronologie de leur engagement dans la tâche et non dans leur niveau d'implication.

Pour des études futures, il serait intéressant de reprendre ce protocole, mais en utilisant différentes tâches perceptives. En effet, la tâche utilisée pour cette étude en était une de reconnaissance d'objets familiers, toutefois le vieillissement sain n'affecte pas seulement cet aspect de la vision. De plus, il serait intéressant de comparer un groupe de personnes âgées dont le vieillissement est sain à un groupe tiré d'une population pathologique, comme des individus ayant une maladie d'Alzheimer ou une démence vasculaire. Ainsi, une comparaison des mécanismes oscillatoires en jeu à travers les groupes pourrait possiblement offrir des profils distincts selon l'état du fonctionnement cérébral/cognitif ou même suggérer l'intérêt de la

technique d'échantillonnage temporel aléatoire pour la détection précoce de pathologies progressives telles les démences.

Références bibliographiques

- Achouline, A. et Arguin, M. (2019). Abstracts of the 19th annual meeting of the Vision Sciences Society, p. 78.
- Allard, R., Renaud, J., Molinatti, S. et Faubert, J. (2013). Contrast sensitivity, healthy aging and noise. *Vision Res*, 92, 47-52. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2013.09.004>
- Allen, J., Hellerstedt, R., Sharma, D. et Bergstrom, Z. M. (2020). Distraction by unintentional recognition: Neurocognitive mechanisms and effects of aging. *Psychol Aging*, 35(5), 639-653. <https://doi.org/10.1037/pag0000398>
- Arguin, M. (2018). *Journal of Vision*, 18, 327. doi:10.1167/18.10.327
- Arguin, M., Ferrandez, R. et Masse, J. (2021). Oscillatory visual mechanisms revealed by random temporal sampling. *Sci Rep*, 11(1), 21309. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00685-w>
- Arguin, M., Macoir, J. et Hudon, C. (2020). Cognistat: normes francophones pour les 60 ans et plus. *Can J Aging*, 39(4), 513-520. <https://doi.org/10.1017/S0714980819000746>
- Arguin, M., et Massé, J. (2019). Abstracts of the 19th annual meeting of the Vision Sciences Society, p. 61.
- Armstrong, N. M., An, Y., Shin, J. J., Williams, O. A., Doshi, J., Erus, G., Davatzikos, C., Ferrucci, L., Beason-Held, L. L. et Resnick, S. M. (2020). Associations between cognitive and brain volume changes in cognitively normal older adults. *Neuroimage*, 223, 117289. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117289>
- Babiloni, C., Del Percio, C., Boccardi, M., Lizio, R., Lopez, S., Carducci, F., Marzano, N., Soricelli, A., Ferri, R., Triggiani, A. I., Prestia, A., Salinari, S., Rasser, P. E., Basar, E., Fama, F., Nobili, F., Yener, G., Emek-Savas, D. D., Gesualdo, ... Frisoni, G. B. (2015). Occipital sources of resting-state alpha rhythms are related to local gray matter density in subjects with amnesic mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Neurobiol Aging*, 36(2), 556-570. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2014.09.011>
- Babiloni, C., Del Percio, C., Lizio, R., Noce, G., Lopez, S., Soricelli, A., Ferri, R., Pascarelli, M. T., Catania, V., Nobili, F., Arnaldi, D., Fama, F., Orzi, F., Buttinelli, C., Giubilei, F., Bonanni, L., Franciotti, R., Onofri, M., Stirpe, P., ... Stocchi, F. (2018). Functional cortical source connectivity of resting state electroencephalographic alpha rhythms shows similar abnormalities in patients with mild cognitive impairment due to Alzheimer's and Parkinson's diseases. *Clin Neurophysiol*, 129(4), 766-782. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2018.01.009>
- Bertone, A., Guy, J. et Faubert, J. (2011). Assessing spatial perception in aging using an adapted Landolt-C technique. *Neuroreport*, 22(18), 951-955. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e32834d2f49>
- Betti, V., Della Penna, S., de Pasquale, F. et Corbetta, M. (2021). Spontaneous Beta Band Rhythms in the Predictive Coding of Natural Stimuli. *Neuroscientist*, 27(2), 184-201. <https://doi.org/10.1177/1073858420928988>

- Birren, J. E. et Fisher, L. M. (1995). Aging and speed of behavior: possible consequences for psychological functioning. *Annu Rev Psychol*, 46, 329-353. <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.46.020195.001553>
- Blais, C., Arguin, M. et Gosselin, F. (2013). Human visual processing oscillates: evidence from a classification image technique. *Cognition*, 128(3), 353-362. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.04.009>
- Bordaberry, P., Lenoble, Q. et Delord, S. (2012). [Aging of visual object recognition: interaction between a "spatial frequency-specific" deficit and a "category-specific" deficit]. *Geriatr Psychol Neuropsychiatr Vieil*, 10(4), 453-462. <https://doi.org/10.1684/pnv.2012.0369>
- Borghini, G., Candini, M., Filannino, C., Hussain, M., Walsh, V., Romei, V., Zokaei, N. et Cappelletti, M. (2018). Alpha Oscillations Are Causally Linked to Inhibitory Abilities in Ageing. *J Neurosci*, 38(18), 4418-4429. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1285-17.2018>
- Bossi, F., Premoli, I., Pizzamiglio, S., Balaban, S., Ricciardelli, P. et Rivolata, D. (2020). Theta and Gamma-Band Activity Discriminates Face, Body and Object Perception. *Front Hum Neurosci*, 14: 74
- Bridger, E. K., Kursawe, A. L., Bader, R., Tibon, R., Gronau, N., Levy, D. A. et Mecklinger, A. (2017). Age effects on associative memory for novel picture pairings. *Brain Res*, 1664, 102-115. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2017.03.031>
- Brodeur, M. B., Kehayia, E., Dion-Lessard, G., Chauret, M., Dionne-Dostie, E., Montreuil, T. et Lepage, M. (2012). The Bank of Standardized Stimuli (BOSS): Comparison between French and English norms. *Behavior Research Methods*, 44, 961-970.
- Busch, N. A., Dubois, J. et VanRullen, R. (2009). The phase of ongoing EEG oscillations predicts visual perception. *J Neurosci*, 29(24), 7869-7876. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0113-09.2009>
- Busch, N. A. et VanRullen, R. (2010). Spontaneous EEG oscillations reveal periodic sampling of visual attention. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 107(37), 16048-16053. <https://doi.org/10.1073/pnas.1004801107>
- Cabeza, R., Albert, M., Belleville, S., Craik, F. I. M., Duarte, A., Grady, C. L., Lindenberger, U., Nyberg, L., Park, D. C., Reuter-Lorenz, P. A., Rugg, M. D., Steffener, J. et Rajah, M. N. (2018). Maintenance, reserve and compensation: the cognitive neuroscience of healthy ageing. *Nat Rev Neurosci*, 19(11), 701-710. <https://doi.org/10.1038/s41583-018-0068-2>
- Chauvin, A., Worley, K. J., Schyns, P. G., Arguin, M. et Gosselin, F. (2005). *Journal of Vision*, 5 (9), 659-667.
- Cheng, C. H., Chan, P. Y., Baillet, S. et Lin, Y. Y. (2015). Age-Related Reduced Somatosensory Gating Is Associated with Altered Alpha Frequency Desynchronization. *Neural Plast*, 2015, 302878. <https://doi.org/10.1155/2015/302878>
- Dushanova, J. et Christov, M. (2014). The effect of aging on EEG brain oscillations related to sensory and sensorimotor functions. *Adv Med Sci*, 59(1), 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.advms.2013.08.002>
- Dziechciaz, M. et Filip, R. (2014). Biological psychological and social determinants of old age: bio-psycho-social aspects of human aging. *Ann Agric Environ Med*, 21(4), 835-838. <https://doi.org/10.5604/12321966.1129943>

- Ehrle, N., Goudour, A., Legrand, A. et Bakchine, S. (2008). [Towards a deterioration of the structural and perceptive representations of objects in physiological aging?]. *Psychol Neuropsychiatr Vieil*, 6(2), 145-156. <https://doi.org/10.1684/pnv.2008.0133>
- Elliott, D. B. (1987). Contrast sensitivity decline with ageing: a neural or optical phenomenon? *Ophthalmic Physiol Opt*, 7(4), 415-419. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3454919>
- Emek-Savas, D.D. (2016). Delta and theta oscillatory activity in physiological aging, mild cognitive impairment and Alzheimer Type Dementia, *Int. Jour. of Psychophysiology*, 108,22-23.
- Engel, A. K. et Fries, P. (2010). Beta-band oscillations--signalling the status quo? *Curr Opin Neurobiol*, 20(2), 156-165. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2010.02.015>
- Enriquez-Geppert, S. et Barcelo, F. (2018). Multisubject Decomposition of Event-related Positivities in Cognitive Control: Tackling Age-related Changes in Reactive Control. *Brain Topogr*, 31(1), 17-34. <https://doi.org/10.1007/s10548-016-0512-4>
- Esposito, R., Cieri, F., Chiacchiarretta, P., Cera, N., Lauriola, M., Di Giannantonio, M., Tartaro, A. et Ferretti, A. (2018). Modifications in resting state functional anticorrelation between default mode network and dorsal attention network: comparison among young adults, healthy elders and mild cognitive impairment patients. *Brain Imaging Behav*, 12(1), 127-141. <https://doi.org/10.1007/s11682-017-9686-y>
- Faubert, J. (2002). Visual perception and aging. *Can J Exp Psychol*, 56(3), 164-176. <https://doi.org/10.1037/h0087394>
- Fédération Québécoise des Sociétés Alzheimer. *Les troubles neurocognitifs au Canada en chiffres*. <https://alzheimer.ca/fr/au-sujet-des-troubles-neurocognitifs/que-sont-les-troubles-neurocognitifs/chiffres>
- Ferrandez, R. (2019). *Profil temporel de l'efficacité du traitement visuel en reconnaissance d'objets et de visages* [mémoire de maîtrise, Université de Montréal]. Papyrus. <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/23828>
- Ferrandez, R., et Arguin, M. (2019). Abstracts of the 19th annual meeting of the Vision Sciences Society, p. 207.
- Fleck, J. I., Kuti, J., Brown, J., Mahon, J. R. et Gayda-Chelder, C. (2016). Frontal-posterior coherence and cognitive function in older adults. *Int J Psychophysiol*, 110, 217-230. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2016.07.501>
- Fonseca, L. C., Tedrus, G. M., Carvas, P. N. et Machado, E. C. (2013). Comparison of quantitative EEG between patients with Alzheimer's disease and those with Parkinson's disease dementia. *Clin Neurophysiol*, 124(10), 1970-1974. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2013.05.001>
- Foo, H., Mather, K. A., Thalamuthu, A. et Sachdev, P. S. (2019). The many ages of man: diverse approaches to assessing ageing-related biological and psychological measures and their relationship to chronological age. *Curr Opin Psychiatry*, 32(2), 130-137. <https://doi.org/10.1097/YCO.0000000000000473>
- Foss, M. P., Formigheri, P. et Speciali, J. G. (2009). Heterogeneity of cognitive aging in Brazilian normal elders. *Dement Neuropsychol*, 3(4), 344-351. <https://doi.org/10.1590/S1980-57642009DN30400014>

- Galluzzi, S., Beltramello, A., Filippi, M. et Frisoni, G. B. (2008). Aging. *Neurol Sci*, 29 Suppl 3, 296-300. <https://doi.org/10.1007/s10072-008-1002-6>
- Gauthier, S., Reisberg, B., Zaudig, M., Petersen, R. C., Ritchie, K., Broich, K., Belleville, S., Brodaty, H., Bennett, D., Chertkow, H., Cummings, J. L., de Leon, M., Feldman, H., Ganguli, M., Hampel, H., Scheltens, P., Tierney, M. C., Whitehouse, P., Winblad, B. et International Psychogeriatric Association Expert Conference on mild cognitive, i. (2006). Mild cognitive impairment. *Lancet*, 367(9518), 1262-1270. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(06\)68542-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(06)68542-5)
- Grajauskas, L. A., Siu, W., Medvedev, G., Guo, H., D'Arcy, R. C. N. et Song, X. (2019). MRI-based evaluation of structural degeneration in the ageing brain: Pathophysiology and assessment. *Ageing Res Rev*, 49, 67-82. <https://doi.org/10.1016/j.arr.2018.11.004>
- Hafkemeijer, A., van der Grond, J. et Rombouts, S.A.R.B. (2012). Imaging the default mode network in aging and dementia. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1822(3), 431-441. <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2011.07.008>
- Harada, C. N., Natelson Love, M. C. et Triebel, K. L. (2013). Normal cognitive aging. *Clin Geriatr Med*, 29(4), 737-752. <https://doi.org/10.1016/j.cger.2013.07.002>
- Harmony, T. (2013). The functional significance of delta oscillations in cognitive processing. *Front Integr Neurosci*, 7, 83. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00083>
- Hasher, L. et Zacks, Rose T. (1988). Working memory, comprehension, and aging: A review and a new view. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*, 22, 193-225. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60041-9](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60041-9)
- Herrmann, C. S., Rach, S., Vosskuhl, J. et Struber, D. (2014). Time-frequency analysis of event-related potentials: a brief tutorial. *Brain Topogr*, 27(4), 438-450. <https://doi.org/10.1007/s10548-013-0327-5>
- Herrmann, C. S., Struber, D., Helfrich, R. F. et Engel, A. K. (2016). EEG oscillations: From correlation to causality. *Int J Psychophysiol*, 103, 12-21. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2015.02.003>
- Hoshi, H. et Shigihara, Y. (2020). Age- and gender-specific characteristics of the resting-state brain activity: a magnetoencephalography study. *Aging*, 12(21), 21613-21637. <https://doi.org/10.18632/aging.103956>
- Hou, F., Liu, C., Yu, Z., Xu, X., Zhang, J., Peng, C. K., Wu, C. et Yang, A. (2018). Age-Related Alterations in Electroencephalography Connectivity and Network Topology During n-Back Working Memory Task. *Front Hum Neurosci*, 12, 484. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00484>
- Huang, Q. et Tang, J. (2010). Age-related hearing loss or presbycusis. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 267(8), 1179-1191. <https://doi.org/10.1007/s00405-010-1270-7>
- Jabes, A., Klencklen, G., Ruggeri, P., Antonietti, J. P., Banta Lavenex, P. et Lavenex, P. (2021). Age-Related Differences in Resting-State EEG and Allocentric Spatial Working Memory Performance. *Front Aging Neurosci*, 13, 704362. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2021.704362>
- Juan, S. M. A. et Adlard, P. A. (2019). Ageing and Cognition. *Subcell Biochem*, 91, 107-122. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3681-2_5
- Kemp, J., Despres, O., Sellal, F. et Dufour, A. (2012). Theory of Mind in normal ageing and neurodegenerative pathologies. *Ageing Res Rev*, 11(2), 199-219. <https://doi.org/10.1016/j.arr.2011.12.001>

- Kiernan, R. J., Mueller, J., Langston, J. W. et Van Dyke, C. (1987). The Neurobehavioral Cognitive Status Examination: a brief but quantitative approach to cognitive assessment. *Ann Intern Med*, 107(4), 481-485. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-107-4-481>
- Kleiner, M., Brainard, D., Pelli, D., Ingling, A., Murray, R. & Broussard, C. (2007). What's new in psychtoolbox-3. *Perception*, 36(14), 1-16.
- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Res Brain Res Rev*, 29(2-3), 169-195. [https://doi.org/10.1016/s0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/s0165-0173(98)00056-3)
- Knyazev, G. G., Volf, N. V. et Belousova, L. V. (2015). Age-related differences in electroencephalogram connectivity and network topology. *Neurobiol Aging*, 36(5), 1849-1859. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2015.02.007>
- Kulasingham, J. P., Brodbeck, C., Presacco, A., Kuchinsky, S. E., Anderson, S. et Simon, J. Z. (2020). High gamma cortical processing of continuous speech in younger and older listeners. *Neuroimage*, 222, 117291. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117291>
- La Fleur, C. G. et Salthouse, T. A. (2014). Out of sight, out of mind? Relations between visual acuity and cognition. *Psychon Bull Rev*, 21(5), 1202-1208. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0594-5>
- Latour, P. L. (1967). Evidence of internal clocks in the human operator. *Acta Psychol*, 27, 341-348. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(67\)90078-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(67)90078-9)
- Lavallée, M-M. (2020). *Hétérogénéité cognitive dans le vieillissement normal : Implications des biomarqueurs de la maladie d'Alzheimer* [thèse de doctorat, Université de Montréal]. Papyrus. <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/25964>
- Lee, A., Tan, M. et Qiu, A. (2016). Distinct Aging Effects on Functional Networks in Good and Poor Cognitive Performers. *Front Aging Neurosci*, 8, 215. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2016.00215>
- Legault, I. et Faubert, J. (2012). Perceptual-cognitive training improves biological motion perception: evidence for transferability of training in healthy aging. *Neuroreport*, 23(8), 469-473. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e328353e48a>
- Lemaitre, H., Goldman, A.L., Sambataro, F., Verchinski, B.A., Meyer-Lindenberg, A., Weinberger, D.D. et Mattay, V.S. (2012). Normal age-related brain morphometric changes: nonuniformity across cortical thickness, surface area and gray matter volume?. *Neurobiology of Aging*, 33(3), 617.e1-617.e9. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2010.07.013>
- Lindenberger, U. (2014). Human cognitive aging: corriger la fortune? *Science*, 346(6209), 572-578. <https://doi.org/10.1126/science.1254403>
- MacAulay, R. K., Halpin, A., Cohen, A. S., Calamia, M., Boeve, A., Zhang, L., Brouillette, R. M., Foil, H. C., Bruce-Keller, A. et Keller, J. N. (2020). Predictors of Heterogeneity in Cognitive Function: APOE-e4, Sex, Education, Depression, and Vascular Risk. *Arch Clin Neuropsychol*, 35(6), 660-670. <https://doi.org/10.1093/arclin/aaa014>
- Mathewson, K. E., Prudhomme, C., Fabiani, M., Beck, D. M., Lleras, A. et Gratton, G. (2012). Making waves in the stream of consciousness: entraining oscillations in EEG alpha and fluctuations in visual awareness with rhythmic visual stimulation. *J Cogn Neurosci*, 24(12), 2321-2333. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00288
- Missonnier, P., Herrmann, F. R., Rodriguez, C., Deiber, M. P., Millet, P., Fazio-costa, L., Gold, G. et Giannakopoulos, P. (2011). Age-related differences on event-related potentials and

- brain rhythm oscillations during working memory activation. *J Neural Transm*, 118(6), 945-955. <https://doi.org/10.1007/s00702-011-0600-2>
- Owsley, C. (2011). Aging and vision. *Vision Res*, 51(13), 1610-1622. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.10.020>
- Owsley, C., Sekuler, R. et Siemsen, D. (1983). Contrast sensitivity throughout adulthood. *Vision Res*, 23(7), 689-699. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(83\)90210-9](https://doi.org/10.1016/0042-6989(83)90210-9)
- Pilz, K. S., Aijala, J. M. et Manassi, M. (2020). Selective age-related changes in orientation perception. *J Vis*, 20(13), 13. <https://doi.org/10.1167/jov.20.13.13>
- Rieder, M. K., Rahm, B., Williams, J. D. et Kaiser, J. (2011). Human gamma-band activity and behavior. *Int J Psychophysiol*, 79(1), 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2010.08.010>
- Ross, J. E., Clarke, D. D. et Bron, A. J. (1985). Effect of age on contrast sensitivity function: unocular and binocular findings. *Br J Ophthalmol*, 69(1), 51-56. <https://doi.org/10.1136/bjo.69.1.51>
- Rossiter, H. E., Davis, E. M., Clark, E. V., Boudrias, M. H. et Ward, N. S. (2014). Beta oscillations reflect changes in motor cortex inhibition in healthy ageing. *Neuroimage*, 91, 360-365. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.01.012>
- Roudaia, E., Bennett, P. J., & Sekuler, A. B. (2013). Contour integration and aging: the effects of element spacing, orientation alignment and stimulus duration. *Front Psychol*, 4, 356. doi:10.3389/fpsyg.2013.00356
- Royall, D. R., Palmer, R., Chiodo, L. K. et Polk, M. J. (2005). Normal rates of cognitive change in successful aging: the freedom house study. *J Int Neuropsychol Soc*, 11(7), 899-909. <https://doi.org/10.1017/s135561770505109x>
- Sambataro, F., Murty, V. P., Callicott, J. H., Tan, H. Y., Das, S., Weinberger, D. R. et Mattay, V. S. (2010). Age-related alterations in default mode network: impact on working memory performance. *Neurobiol Aging*, 31(5), 839-852. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2008.05.022>
- Sapkota, R. P., van der Linde, I. et Pardhan, S. (2020). How does aging influence object-location and name-location binding during a visual short-term memory task? *Aging Ment Health*, 24(1), 63-72. <https://doi.org/10.1080/13607863.2018.1515887>
- Sauseng, P. et Klimesch, W. (2008). What does phase information of oscillatory brain activity tell us about cognitive processes? *Neurosci Biobehav Rev*, 32(5), 1001-1013. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.03.014>
- Sauve, K. (1999). Gamma-band synchronous oscillations: recent evidence regarding their functional significance. *Conscious Cogn*, 8(2), 213-224. <https://doi.org/10.1006/ccog.1999.0383>
- Savage, S. W., Spano, L. P. et Bowers, A. R. (2019). The effects of age and cognitive load on peripheral-detection performance. *J Vis*, 19(1), 15. <https://doi.org/10.1167/19.1.15>
- Schmiedt-Fehr, C. et Basar-Eroglu, C. (2011). Event-related delta and theta brain oscillations reflect age-related changes in both a general and a specific neuronal inhibitory mechanism. *Clin Neurophysiol*, 122(6), 1156-1167. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2010.10.045>
- Schmiedt-Fehr, C., Mathes, B., Kedilaya, S., Krauss, J. et Basar-Eroglu, C. (2016). Aging differentially affects alpha and beta sensorimotor rhythms in a go/nogo task. *Clin Neurophysiol*, 127(10), 3234-3242. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2016.07.008>

- Scialfa, C. T., Cordazzo, S., Bubric, K. et Lyon, J. (2013). Aging and visual crowding. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci*, 68(4), 522-528. <https://doi.org/10.1093/geronb/gbs086>
- Sebastian, M. et Ballesteros, S. (2012). Effects of normal aging on event-related potentials and oscillatory brain activity during a haptic repetition priming task. *Neuroimage*, 60(1), 7-20. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.11.060>
- Sebastian, M., et al. (2011). Ageing affects event-related potentials and brain oscillations: a behavioral and electrophysiological study using a haptic recognition memory task. *Neuropsychologia* 49(14): 3967-3980. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.11.060>
- Shrout, P. E. et Fleiss, J. L. (1979). Intraclass correlations: Uses in assessing rater reliability. *Psychol. Bull.* 86, 420–428. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.86.2.420>
- Tang, Y. et Zhou, Y. (2009). Age-related decline of contrast sensitivity for second-order stimuli: earlier onset, but slower progression, than for first-order stimuli. *J Vis*, 9(7), 18. <https://doi.org/10.1167/9.7.18>
- Toepper, M. (2017). Dissociating Normal Aging from Alzheimer's Disease: A View from Cognitive Neuroscience. *J Alzheimers Dis*, 57(2), 331-352. <https://doi.org/10.3233/JAD-161099>
- Valdois, S., Joannette, Y., Poissant, A., Ska, B. et Dehaut, F. (1990). Heterogeneity in the cognitive profile of normal elderly. *J Clin Exp Neuropsychol*, 12(4), 587-596. <https://doi.org/10.1080/01688639008401003>
- Van Diepen, R. M., Foxe, J. J. et Mazaheri, A. (2019). The functional role of alpha-band activity in attentional processing: the current zeitgeist and future outlook. *Curr Opin Psychol*, 29, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2019.03.015>
- Vandervoort, A. A. (2002). Aging of the human neuromuscular system. *Muscle Nerve*, 25(1), 17-25. <https://doi.org/10.1002/mus.1215>
- Villeneuve, S. et Belleville, S. (2010). [Cognitive reserve and neuronal changes associated with aging]. *Psychol Neuropsychiatr Vieil*, 8(2), 133-140. <https://doi.org/10.1684/pnv.2010.0214>
- Vlahou, E. L., Thurm, F., Kolassa, I. T. et Schlee, W. (2014). Resting-state slow wave power, healthy aging and cognitive performance. *Sci Rep*, 4, 5101. <https://doi.org/10.1038/srep05101>
- Wang, L., Wang, W., Yan, T., Song, J., Yang, W., Wang, B., Go, R., Huang, Q. et Wu, J. (2017). Beta-Band Functional Connectivity Influences Audiovisual Integration in Older Age: An EEG Study. *Front Aging Neurosci*, 9, 239. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00239>
- West, R., Murphy, K. J., Armilio, M. L., Craik, F. I. et Stuss, D. T. (2002). Lapses of intention and performance variability reveal age-related increases in fluctuations of executive control. *Brain Cogn*, 49(3), 402-419. <https://doi.org/10.1006/brcg.2001.1507>
- Wiegand, I., Finke, K., Muller, H. J. et Tollner, T. (2013). Event-related potentials dissociate perceptual from response-related age effects in visual search. *Neurobiol Aging*, 34(3), 973-985. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2012.08.002>
- Wiesman, A. I. et Wilson, T. W. (2019). The impact of age and sex on the oscillatory dynamics of visuospatial processing. *Neuroimage*, 185, 513-520. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.10.036>
- Ylikoski, R., Ylikoski, A., Keskiavaara, P., Tilvis, R., Sulkava, R. et Erkinjuntti, T. (1999). Heterogeneity of cognitive profiles in aging: successful aging, normal aging, and individuals at risk for cognitive decline. *Eur J Neurol*, 6(6), 645-652. <https://doi.org/10.1046/j.1468-1331.1999.660645.x>

Yordanova, J. Y., Kolev, V. N. et Basar, E. (1998). EEG theta and frontal alpha oscillations during auditory processing change with aging. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 108(5), 497-505. [https://doi.org/10.1016/s0168-5597\(98\)00028-8](https://doi.org/10.1016/s0168-5597(98)00028-8)