

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

LES CORRÉLATS NEUROPHYSIOLOGIQUES DU CONTRÔLE ATTENTIONNEL CHEZ
LES JEUNES ET LES AÎNÉS VUS PAR L'IMAGERIE OPTIQUE PROCHE INFRAROUGE

THÈSE
PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN PSYCHOLOGIE

PAR
MAUDE LAGUË-BEAUVAIS

DÉCEMBRE 2013

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Comme pour tant d'autres, mon parcours doctoral a connu des succès et des revers. Voici les personnes sans qui ce travail n'aurait pu être effectué. Elles m'ont écoutée ou appuyée à leur manière pendant ce long cheminement, célébrant avec moi les bons coups et m'offrant leur soutien lors de moments plus difficiles.

D'abord, un grand merci au Dr. Louis Bherer, directeur de thèse, qui m'a acceptée dans son laboratoire alors que lui-même en était à ses débuts comme professeur. Il m'a fait confiance, malgré mon manque d'expérience en imagerie optique. Nos longues conversations sur la science et son appui financier par rapport aux diverses formations que j'ai reçues ont sans aucun doute contribué à la rédaction de cette thèse. Ses exigences élevées m'ont par moment terrifiée, mais grâce à elles j'ai pu donner le meilleur de moi-même.

Je remercie les membres du LESCA qui m'ont accompagnée au cours de ce travail, en particulier Nathalie Castonguay, Sarah Fraser, Francis Langlois et Émilie de Tournay-Jetté, pour leur écoute, leur appui, leur fidélité et leur intégrité. Leur amitié me fut indispensable. Une mention particulière va également à Laurence Desjardins-Crépeau, Julie Brunet et Nathalie Castonguay (une fois de plus!) pour leur aide dans la collecte de données et leur force d'organisation.

Associés au LESCA afin de rendre réalisables les études en imagerie optique, les gens du laboratoire de Frédéric Lesage, soit Mathieu Dehaes, Mathieu Coursolle, Sarah Chapuisat, Michèle Desjardins et Frédéric Lesage lui-même, m'ont guidée à travers les méandres de Matlab. Ils m'ont en outre autorisée à utiliser leurs scripts et fait profiter de leur conversation si intéressante. De l'UQAM, je remercie André Achim pour son intérêt et son implication en imagerie optique, qu'il a généreusement partagés avec moi.

Le doctorat en psychologie serait incomplet sans internat clinique. Plusieurs excellents mentors m'ont permis d'approfondir ma vision de la neuropsychologie. Je remercie Isabelle Rouleau, toujours soucieuse de mon parcours et habile à me guider au besoin. Je n'oublie pas non plus mes superviseurs de l'Institut Douglas, Rachel Green, Nathalie Désormeaux et David Fontaine, qui m'ont si humainement et passionnément initiée au monde de la psychiatrie. Je suis reconnaissante envers mes superviseurs de l'Institut neurologique de Montréal, soit Gabriel Leonard, pour m'avoir permis de débiter comme clinicienne de façon autonome, et Joelle Crane, Vivian Sziklas et Jelena Djordjevic, pour m'avoir transmis leur passion à lier science et clinique.

Lors du baccalauréat, de grands pédagogues m'ont formée en méthodologie de la recherche et en imagerie cérébrale. Je remercie Natalie Phillips et Marco Sinai d'avoir eu la patience d'expliquer et de m'enseigner des techniques complexes, tout en me communiquant leur enthousiasme.

Un merci empreint d'amour à mes parents, Monique et Réal. De mon père, je me suis appliquée à reproduire la patience, la détermination, l'humour et l'amour de la connaissance. Ma mère m'a inspirée par son altruisme, son empathie, son efficacité et sa curiosité. Ces cadeaux de vie m'ont été particulièrement utiles durant mes études, tout comme leur appui indéfectible lorsque le doute ou l'inquiétude semblait vouloir prendre le dessus. L'ensemble de mon entourage m'a entendu parler d'eux et sait à quel point ils sont importants pour moi. Je remercie de même ma tante Lorraine Beauvais, mon cousin Olivier Côté, et ma grand-mère Marie-Anna Bricault, décédée pendant mes études doctorales, pour leur amour inconditionnel et leur soutien sans limite.

I must also thank Kevin Leung, my dear love, who makes me laugh, talks about completely science-unrelated things to keep me sane and is my source of comfort day in and day out. We all know going out with a 32 year old student is not always fun and he managed to find in his heart the patience to wait for me as I enter life post-graduation.

Enfin, je souhaite remercier mes amis et collègues. Vous êtes nombreux, je me concentrerai donc sur ceux qui ont été particulièrement importants au cours de mon cheminement doctoral. À mon amie de toujours Micheline Nguyen, merci tout spécialement pour ton écoute, ta délicatesse et ton amour de l'absurde, qui m'ont toujours apporté perspective et réconfort. Sans ordre particulier, je veux que les personnes suivantes sachent qu'elles sont dans mon cœur, et fort appréciées pour toutes les qualités qui les rendent uniques : Élane de Guise, Mitra Feyz, Selma Greffou, Émilie Jouvin, Shanna Koussaie, Julie Mercier, Danielle O'Brien, Céline Rainville, Nathalie Saint-Pierre et Johanna Vyncke. Enfin, mes remerciements à tous les membres anciens et nouveaux de l'Ensemble vocal Extravaganza qui depuis huit ans, peu importe mon état, me reçoivent tous les mercredis soirs pour chanter et m'aider à rester en contact avec les arts, et d'ainsi faire contrepoids à toute cette science qui emplit mes journées.

À Marie-Anna...

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES.....	V
LISTE DES FIGURES.....	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES ABBRÉVIATIONS.....	XI
LISTE DES SYMBOLES.....	XIII
RÉSUMÉ.....	XIV
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I.....	3
CADRE THÉORIQUE.....	3
1.1 Théories du vieillissement en neuroscience.....	3
1.2 Contrôle attentionnel.....	10
1.2.1 Inhibition.....	13
1.2.2 Alternance.....	14
1.2.3 Attention divisée.....	16
1.3 Spectroscopie proche par infra-rouge fonctionnelle (SPiRF).....	18
1.4 Objectifs.....	21
CHAPITRE II.....	23
ENJEUX ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL.....	23
2.1 Inhibition et alternance.....	23
2.2 Attention divisée.....	24
CHAPITRE III.....	27
Article I	
Référence : Laguë-Beauvais, M., Brunet, J., Gagnon, L., Lesage, F., & Bherer, L. (2013). A fNIRS investigation of switching and inhibition during the modified Stroop task in younger and older adults. <i>Neuroimage</i> , 64, 485-495.	
3.1 Abstract.....	28
3.2 Introduction.....	28

3.3	Materials and method.....	36
3.3.1	Participants	36
3.3.2	Behavioral task	37
3.3.3	fNIRS acquisition and analysis.....	39
3.3.4	Statistical analysis	41
3.4	Results.....	42
3.4.1	Behavioral results	42
3.4.2	fNIRS data.....	43
3.5	Discussion	45
3.6	Funding	50
3.7	Acknowledgments.....	50
3.8	Tables.....	51
3.9	Figures	55
3.10	References.....	58
	CHAPITRE IV	65
	Article II	
	Référence : Laguë-Beauvais, M., Fraser, S. A., Desjardins-Crépeau, L., Castonguay, N., Desjardins, M., Lesage, F., & Bherer, L. (en révision). Shedding light on the effect of priority instructions during dual-task performance in younger and older adults: A fNIRS study. <i>Brain and Cognition</i> .	
4.1	Abstract.....	66
4.2	Highlights.....	66
4.3	Introduction.....	67
4.4	Method	70
4.4.1.	Participants	70
4.4.2.	Behavioral task	71
4.4.3.	fNIRS acquisition and analyses.....	72
4.4.4.	Statistical analyses.....	74
4.5	Results.....	76
4.5.1.	Behavioural Analysis.....	76
4.5.2.	fNIRS	79
4.5.3.	Correlations between Behavioral Performance and Concentration Changes	81

4.6	Discussion.....	81
4.6.1.	Behavioural Findings.....	82
4.6.2	Imaging Findings.....	83
4.6.3	Correlations between Brain and Behaviour.....	85
4.6.4.	Limitations of the current study.....	87
4.6.5.	Conclusions.....	87
4.7	Acknowledgements.....	88
4.8	Funding.....	88
4.9	Tables.....	89
4.10	Figures.....	95
4.11	References.....	104
	CHAPITRE V.....	108
	DISCUSSION GÉNÉRALE.....	108
5.1	Rappel de la première étude.....	108
5.2	Deuxième étude.....	111
5.3	Apport de la thèse.....	114
5.4	Limites.....	116
5.4.1	Problèmes spécifiques à la recherche en vieillissement.....	116
5.4.2	Problèmes liés à l'imagerie.....	117
5.5	Recherches futures.....	119
	CONCLUSION.....	121
	ANNEXES.....	122
	ANNEXE 1.....	123
	FORMULAIRES DE CONSENTEMENT.....	123
	ANNEXE 2.....	144
	APPROBATION SCIENTIFIQUE ET ÉTHIQUE.....	144
	ANNEXE 3.....	147
	PREUVE DE SOUMISSION DE L'ARTICLE 2.....	147
	ANNEXE 4.....	149
	DEMANDE DE PUBLICATION DANS LE JOURNAL OF VISUALIZED EXPERIMENTS (JOVE).....	149
	RÉFÉRENCES.....	151

LISTE DES FIGURES

PREMIÈRE ÉTUDE

Figure

- 3.1 Representation of significant results for younger adults in the optode array for HbO and HbR in the denomination, interference and switching conditions56
- 3.2 Representation of significant results for older adults in the optode array for HbO and HbR in the denomination, interference and switching conditions 57

DEUXIÈME ÉTUDE

- 4.1 Illustration of the ABBA design of the experiment with Color and Letter tasks in Pure and Mixed trials 97
- 4.2 Response times (ms) and accuracy (%) for both younger and older adults 98
- 4.3. Response times costs (ms) and the lower graph accuracy costs (%) for both younger and older adults. 99
- 4.4 Representation of significant results for younger adults in the optode array for HbO and HbR in the SP, SM and DM conditions of the Priority condition 100
- 4.5 Representation of significant results for younger adults in the optode array for HbO and HbR in the SP, SM and DM conditions of the Equal condition 101
- 4.6 Representation of significant results for older adults in the optode array for HbO and HbR in the SP, SM and DM conditions of the Priority condition 102
- 4.7 Representation of significant results for older adults in the optode array for HbO and HbR in the SP, SM and DM conditions of the Equal condition 103

LISTE DES TABLEAUX

PREMIÈRE ÉTUDE

Tableau

- 3.1 Demographic variables and performances in neuropsychological tests for both younger and older adults 51
- 3.2 Reaction times (ms) and accuracy (% of correct responses) for younger and older adults in the four conditions of the modified Stroop task 52
- 3.3 Mean hemodynamic response (μM) variations observed at each of the 14 pairs of both hemispheres during the four conditions of the Modified Stroop Task in younger adults53
- 3.4 Mean hemodynamic response (μM) variations observed at each of the 14 pairs of both hemispheres during the four conditions of the Modified Stroop Task in older adults 54

DEUXIÈME ÉTUDE

Tableau

- 4.1 Demographic variables and performances in neuropsychological tests for both younger and older adults 89
- 4.2 Results of RT and accuracy data for the Task (letter vs. color) \times Trial type (SP vs. SM vs. DM) \times Age (younger vs. older adults) ANCOVAs in the Priority and Equal conditions 90
- 4.3 Mean hemodynamic response (μM) variations observed at each of the 14 pairs of both hemispheres for Single Pure and Single Mixed conditions of the DT in younger adults91

- 4.4 Mean hemodynamic response (μM) variations observed at each of the 14 pairs of both hemispheres for Dual Mixed conditions in younger adults 92
- 4.5 Mean hemodynamic response (μM) variations observed at each of the 14 pairs of both hemispheres for Single Pure and Single Mixed conditions of the DT in older adults 93
- 4.6 Mean hemodynamic response (μM) variations observed at each of the 14 pairs of both hemispheres for Dual Mixed conditions in older adults 94

LISTE DES ABBRÉVIATIONS

En français :

AB	Aire de Brodmann
CPF DL	Cortex préfrontal dorso-latéral
CPF VL	Cortex préfrontal ventro-latéral
DM	Doubles mixtes
DT	Double-tâche
HbO	oxyhémoglobine
HbR	déoxyhémoglobine
IRMf	Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
PRP	Période réfractaire psychologique
SM	Simplex mixtes
SP	Simplex purs
SPiR	Spectroscopie proche infrarouge
SPiRf	Spectroscopie proche infrarouge fonctionnelle

En anglais :

ANOVA	Analysis of Variance
BA	Brodman Areas
BOLD	Blood Oxygenation Level Dependent
CRUNCH	Compensation-Related Utilization of Neural Circuits Hypothesis
DLPFC	Dorsolateral Prefrontal Cortex
DM	Dual Mixed
DPF	Differential Path length Factor
DT	Dual-Task

fMRI	functional Magnetic Resonance Imaging
fNIRS	functional Near Infrared Spectroscopy
GLM	General Linear Model
HAROLD	Hemispheric Asymmetry Reduction in Older Adults
HbO	oxy-hemoglobin
HbR	deoxy-hemoglobin
LSD	Least significant difference
NIRS	Near Infrared Spectroscopy
PFC	Prefrontal Cortex
PRP	Psychological Refractory Period
ROI	Regions of Interest
RT	Response Time
SM	Simple mixed
SP	Simple Pure
STAC	Scaffolding Theory of Aging and Cognition
VLPFC	Ventrolateral Prefrontal Cortex
WAIS-III	Wechsler Adult Intelligence Scale—III
WAIS-R	Wechsler Adult Intelligence Scale—Revised

LISTE DES SYMBOLES

cm	centimètre
F	test statistique
Hz	Hertz
ms	milliseconde
n	taille de l'échantillon
nm	nanomètre
p	probabilité
s	seconde
η^2	taille d'effet

RÉSUMÉ

De nombreuses études en imagerie ont rapporté des différences d'activation cérébrale par rapport aux fonctions liées au contrôle attentionnel, telles que l'inhibition, l'alternance et l'attention divisée. Toutefois, les différences liées à l'âge dans les patrons d'activation dans plus d'une tâche de contrôle attentionnel à la fois ont rarement été étudiées chez les mêmes groupes de participants. Deux études ont donc été effectuées : la première porte sur une comparaison directe de l'inhibition et de l'alternance, alors que la seconde se penche sur l'effet de la priorisation en attention divisée.

Dans l'étude I, de jeunes adultes ($n = 21$) et des aînés ($n = 19$) ont complété une version modifiée de la tâche de Stroop qui inclut une condition d'interférence et une d'alternance, alors que l'activation du cortex préfrontal est mesurée à l'aide de la spectroscopie proche infrarouge fonctionnelle (SPIRf). Bien que la condition interférence n'ait révélé aucune activation significative chez les jeunes adultes, la condition alternance a produit une augmentation de l'activation bilatérale au niveau du cortex préfrontal dorso-latéral (CPF DL) et du cortex préfrontal ventro-latéral (CPF VL). Chez les aînés, une activation isolée au niveau du CPF DL bilatéral a été observée même dans les conditions non-exécutives de la tâche de Stroop (dénomination de couleur), et la condition interférence a révélé une activation principalement localisée dans le CPF DL postérieur gauche et dans le CPF VL bilatéral, ainsi qu'une petite composante au niveau du CPF DL antérieur droit. Chez les aînés spécifiquement, l'alternance a produit un étalement bilatéral de l'activation du cortex préfrontal au niveau du CPF DL antérieur bilatéral, du CPF DL postérieur gauche et du CPF VL bilatéral. Ces résultats suggèrent que chez les aînés et les jeunes adultes, les mécanismes d'inhibition et d'alternance sont associés à des patrons différents d'activation préfrontale, ce qui conforte la théorie selon laquelle ces deux mécanismes sont distincts. De plus, les patrons d'activation diffèrent entre les jeunes et les aînés, de sorte que l'activation préfrontale semble être plus étendue à différents sites chez les aînés. Les disparités observées entre l'inhibition et l'alternance en termes d'activation révèlent aussi que ces deux mécanismes se modifient différemment au cours du vieillissement normal.

La seconde étude montre les différences liées à l'âge par rapport à la capacité d'accomplir deux tâches simultanément. L'effet de l'âge sur les performances en double-tâche est maintenant étudié en neurosciences au moyen de deux paradigmes, la période réfractaire psychologique (PRP) et la double-tâche (DT). Les études de PRP évaluent les participants lorsqu'ils donnent priorité à une tâche par rapport à l'autre (compléter la tâche A et ensuite la tâche B), alors que les participants des études en DT doivent se concentrer sur les deux tâches simultanément (compléter la tâche A et B). Il est logique de penser que cette condition ajoute une composante exécutive de contrôle additionnelle à la tâche, puisque les participants doivent spontanément gérer leur attention entre les tâches. Cette composante

additionnelle pourrait expliquer les divergences de résultats entre les études de PRP et DT. La présente étude vise à vérifier cette hypothèse en évaluant l'effet des instructions de priorité (priorisées vs égales) sur les performances en double-tâche. En plus des mesures comportementales, l'activité cérébrale de jeunes adultes ($n = 16$) et de personnes âgées ($n = 19$) a été mesurée à l'aide de la SPIRF. Dans la condition priorisée, on observe une activation du cortex préfrontal droit pendant l'exécution de la DT chez les jeunes adultes. Chez les personnes âgées, l'activation devient bilatérale, mais restreinte à des aires spécifiques, et implique le CPFDL gauche et le CPFVL bilatéral. Dans la condition égale, la condition DT montre une activation isolée dans le CPFDL et CPFVL gauches et CPFDL postérieur droit chez les jeunes adultes, et un étalement bilatéral de l'activation en CPFDL chez les participants âgés. Ces résultats montrent que tant chez les jeunes adultes que les personnes âgées, les effets de priorité sont associés à des patrons d'activation préfrontale distincts. En condition égale, les activations impliquent des régions frontales plus étendues et bilatérales comparativement aux conditions à priorité fixe. Ces résultats supportent l'hypothèse que la condition égale (en DT) exige davantage de contrôle attentionnel. Des différences liées à l'âge existent, le vieillissement étant associé à un étalement de l'activation à différents sites chez les personnes âgées, mais surtout lorsque l'instruction de donner une priorisation égale aux deux tâches est donnée.

Les résultats de ces deux études montrent des patrons d'activation préfrontale différents pour les mécanismes d'inhibition, d'alternance et d'attention divisée. Ces résultats ont des implications pratiques et théoriques. Sur le plan pratique, ils montrent que la SPIRF peut mesurer de façon précise les patrons d'activation des mécanismes de contrôle attentionnel distincts et ce, tant chez les jeunes adultes que chez les personnes âgées. Sur le plan théorique, ces résultats apportent un appui aux propositions selon lesquelles il existe des mécanismes distincts de contrôles attentionnels supportés par différents ensembles de régions ou de réseaux préfrontaux du cortex cérébral. De plus, les résultats suggèrent que ces mécanismes impliquent des régions frontales plus étendues chez les personnes âgées que chez les jeunes. Les résultats appuient principalement l'hypothèse du *Scaffolding Theory of Aging and Cognition* (STAC). Ce modèle indique que les aînés réussissent à maintenir un haut niveau de fonctionnement, étant donné l'engagement continu d'un échafaudage compensatoire, soit le recrutement de circuits additionnels étayant les structures en déclin dont le fonctionnement est devenu bruité, inefficace ou les deux. Cet échafaudage dynamique est une propriété d'un cerveau qui s'adapte à son déclin afin de maintenir la meilleure homéostasie possible (Park & Reuter-Lorenz, 2009). Le niveau du fonctionnement cognitif est alors déterminé par le niveau de la détérioration neuronale, le niveau de la détérioration fonctionnelle et le niveau de compensation créé par l'échafaudage (Drag & Bieliauskas, 2010; Park & Reuter-Lorenz, 2009)

Mots clés : contrôle attentionnel, vieillissement normal, SPIRF, lobes frontaux

INTRODUCTION

Au Canada, plus de 20% de la population aura 65 ans et plus d'ici 2026 (Milan, 2011), ce qui engendrera des impacts sociaux et économiques importants. Pourtant, ce domaine de recherche a souvent été minimisé et a seulement gagné en popularité au cours des dernières décennies. Ce vieillissement démographique risque en outre d'affecter le système de santé. De 2000 à 2030, on prédit une augmentation de 1,5% des frais de santé par année au Québec (Lefebvre & Soderstrom, 2000). Une part de ces frais sera liée aux modifications structurales et fonctionnelles du système nerveux dues à l'âge, qui ont des conséquences importantes sur le plan cognitif (Raz, 2000) et augmentent les risques de démence et d'accident vasculaire cérébral. Sans nécessairement être lié à une pathologie, le vieillissement normal est aussi associé à une augmentation des accidents de la route, une des causes étant la diminution des capacités attentionnelles (Anstey & Wood, 2011; Hoffman, McDowd, Atchley, & Dubinsky, 2005).

Bien plus que l'effet du simple passage du temps sur le corps humain, le vieillissement est un construit complexe aux multiples facettes affectant le corps et le cerveau de tous les individus. Le phénomène complexe du vieillissement peut être défini comme un ensemble dynamique de gains et de pertes lié à l'expérience et à des changements physiologiques et neurophysiologiques (Ballesteros, Nilsson, & Lemaire, 2009), d'où s'ensuit une diminution progressive des aptitudes de l'organisme à assurer ses fonctions, et allant jusqu'à la mort.

Cette thèse porte un regard sur le vieillissement psychophysiologique du contrôle attentionnel, en comparant les jeunes et les aînés sains à l'aide de la spectroscopie proche infrarouge fonctionnelle (SPIRf). Le chapitre 1 traite d'abord des théories du vieillissement

en neuroscience, suivies d'une revue de la littérature concernant le contrôle attentionnel et les fonctions cognitives qui y sont associées. Le fonctionnement de la SPIRf est ensuite expliqué. Le chapitre 2 présente les démarches méthodologiques de la thèse ainsi que les hypothèses liées aux deux études. Deux articles en recherche expérimentale sont ensuite présentés. Le premier concerne les mécanismes de l'inhibition et de l'alternance (Chapitre 3), et le second, l'effet de la priorisation en attention divisée (Chapitre 4). Enfin, on discutera de l'apport de cette thèse au domaine du vieillissement et des limites méthodologiques (Chapitre 5).

CHAPITRE I

CADRE THÉORIQUE

1.1 Théories du vieillissement en neuroscience

Les fonctions exécutives désignent des fonctions cognitives de haut niveau permettant d'être flexible et de s'adapter au contexte environnemental. Ces fonctions se dégradent lorsqu'on avance en âge. Cette diminution a souvent été associée en partie au fait que les régions frontales et préfrontales du cortex sont touchées précocement au cours du vieillissement (Raz, 2000). Plusieurs changements structuraux observés expliquent cette dégradation. Il y a d'abord, à partir de 20 ans, une baisse linéaire du volume de la matière grise de 5% par décennie. Cette baisse de volume est due à une diminution de la densité synaptique retrouvée principalement dans le cortex préfrontal et les structures temporales moyennes (Hedden & Gabrieli, 2004). Bien qu'on note parfois une augmentation de la connectivité fonctionnelle entre les diverses régions cérébrales chez les aînés, l'habileté des personnes âgées à distribuer le traitement cérébral dans les deux hémisphères est contrainte par l'intégrité de la matière blanche (Davis, Kragel, Madden, & Cabeza, 2012). D'ailleurs, cette diminution de la matière blanche lors du vieillissement affecte principalement la boucle frontostriatale. Celle-ci relie le cortex préfrontal au striatum et inclue les projections partant du cortex enthorinal qui relie entre autres le cortex préfrontal à l'hippocampe. Conséquemment, on note une augmentation de la difficulté à gérer l'interférence entre différentes informations, une persévération accrue, un déclin de la mémoire de travail et de la vitesse de traitement, et une baisse d'efficacité des fonctions exécutives (Hedden & Gabrieli,

2004; Madden, Bennett, & Song, 2009). Le système cérébrovasculaire connaît aussi des changements au cours du vieillissement. Drag et Bieliauskas (2010) rapportent une diminution du flux sanguin au repos, du taux métabolique de la consommation de l'oxygène et de la réactivité vasculaire de vaisseaux cérébraux à divers modulateurs chimiques. Le flux sanguin associé aux réponses cognitives, soit le flux sanguin fonctionnel, montre aussi des divergences par rapport aux jeunes (voir la section 1.3 de ce chapitre pour plus de détails). Au niveau neuronal, les études montrent une diminution de l'efficacité des neurotransmetteurs et de l'habileté de la synapse à répondre aux stimuli [(Goh, 2011) mais voir Bishop, Lu, et Yankner (2010) pour une revue complète de la littérature sur le lien entre les mécanismes neuronaux du vieillissement et le déclin cognitif]. Par exemple, on note une diminution du nombre de récepteurs liés à la dopamine, un neurotransmetteur particulièrement impliqué dans la boucle frontostriatale (Kaasinen, et al., 2000), ainsi qu'une réduction de l'efficacité de l'acide gamma-aminobutyrique (GABA) dans les régions cérébrales postérieures chez les singes (Leventhal, Wang, Pu, Zhou, & Ma, 2003). La réponse synaptique, telle que la potentialisation et la dépression à long terme, subit également des modifications lors du vieillissement, particulièrement au niveau de l'hippocampe (Goh, 2011; Nieto-Sampedro & Nieto-Diaz, 2005). De plus, on note une réduction de la neurogénèse, créant de l'atrophie à l'intérieur de régions cérébrales (Goh, 2011; Nieto-Sampedro & Nieto-Diaz, 2005). On conclut donc que les changements structuraux et neurobiologiques limitent l'aptitude des cerveaux âgés à traiter les stimuli de manière distincte, ce qui entraîne des changements cognitifs, et par le fait même, des changements comportementaux (Goh, 2011). Conséquemment, les changements cognitifs liés au vieillissement seraient dus à une baisse de l'efficacité du transfert de l'information d'une région à l'autre, à une réduction du traitement représentatif dans les régions postérieures, ainsi qu'à une diminution de l'efficacité du fonctionnement exécutif dans les régions frontales. Quant aux changements comportementaux, ils seraient causés par une diminution de la performance lors de la discrimination, une plus grande sensibilité aux leurres dans les tests de mémoire, un ralentissement de la vitesse de réponse, de même qu'une diminution de la performance en mémoire de travail et lors des tâches impliquant les fonctions exécutives (Goh, 2011).

Dans le domaine de la cognition, les études d'imagerie cérébrale ont connu une grande popularité dans les dernières années. Lorsque les jeunes et les aînés sont comparés sur diverses tâches, la nature des résultats peut varier ainsi (Spreng, Wojtowicz, & Grady, 2010):

- 1) soit les jeunes adultes et les aînés ont des résultats équivalents;
- 2) soit les aînés présentent une diminution de l'activité cérébrale par rapport aux jeunes adultes;
- 3) soit les aînés présentent une augmentation de l'activité cérébrale par rapport aux jeunes adultes.

Dans le cas où l'activation chez les jeunes et les aînés est équivalente, on s'attend généralement à ce que le fonctionnement cognitif associé soit préservé. Pourtant, il se peut que la performance comportementale soit plus faible chez les aînés en comparaison avec les jeunes adultes [e.g., Zarahn Zarahn, Rakitin, Abela, Flynn, et Stern (2007)], indiquant probablement une utilisation moins efficace des ressources neuronales (Spreng, et al., 2010). Si l'activité est réduite chez les aînés, on attribue généralement à ce fait une diminution du niveau de fonctionnement cérébral, en particulier lorsqu'on assiste à une diminution des performances comportementales [e.g., Grady, Springer, Hongwanishkul, McIntosh, et Winocur (2006) et Rypma (2000)]. Le dernier cas, i.e., soit l'augmentation de l'activité cérébrale chez les personnes âgées, est le plus difficile à interpréter. Il peut s'agir d'un sur-recrutement des processus neuronaux, d'une dédifférentiation physiologique (Logan, Sanders, Snyder, Morris, & Buckner, 2002) ou encore d'une réduction de la spécificité de la réponse pendant une tâche [pour des revues de littérature, Cabeza (2002), Grady (2008, 2012), Rajah et D'Esposito (2005)]. La dédifférentiation se définit par une diminution de la spécialisation des régions cérébrales ayant des processus cognitifs spécifiquement attribués chez les jeunes adultes, ainsi que l'augmentation d'une réponse plus similaire des diverses régions lorsque différents processus cognitifs sont engagés (Goh, 2011).

Les études sur la cognition ont aussi permis d'identifier des changements neuronaux pouvant expliquer le vieillissement attentionnel au niveau du lobe frontal. Selon Reuter-Lorenz (2002), les résultats rapportés ces dernières années traduisent trois phénomènes. Premièrement, on assiste à une diminution de l'activation des corrélats neurophysiologiques pour des tâches spécifiques chez les aînés en ce qui a trait à la résolution de l'interférence.

Deuxièmement, même lorsque les résultats comportementaux sont semblables chez les deux groupes d'âge, les régions cérébrales activées diffèrent lors de l'accomplissement de tâches supposées impliquer les mêmes mécanismes. Enfin, il semble que les aînés démontrent une plus grande activation bilatérale pour des tâches très latéralisées chez les jeunes, notamment les tâches de mémoire épisodique et de mémoire de travail spatiale et verbale. Les modèles HAROLD (Cabeza, 2002), STAC (Goh & Park, 2009; Park & Reuter-Lorenz, 2009) et CRUNCH (Reuter-Lorenz & Park, 2010) tentent de rendre compte de ces phénomènes.

Le modèle HAROLD (*Hemispheric Asymmetry Reduction in Older Adults* ; Cabeza, 2002), soit la réduction hémisphérique de l'asymétrie chez les personnes âgées, vise à expliquer le déclin de la performance au niveau neurophysiologique et les différences d'activation cérébrale entre personnes jeunes et âgées. Ce modèle indique qu'il y aurait une perte de la latéralisation de l'activité neuronale au cours du vieillissement lors de tâches de récupération en mémoire épisodique, mémoire de travail, perception et inhibition chez les personnes de 60 à 80 ans. Cette bilatéralisation se caractériserait par une augmentation de l'activation dans l'hémisphère controlatéral, alors que l'activation resterait sensiblement la même dans l'hémisphère ipsilatéral. Selon le modèle HAROLD, l'activité neuronale trouvée chez les aînés aurait un rôle compensatoire, puisque les personnes âgées ont de la difficulté à engager les mécanismes neuronaux appropriés pour réaliser leur tâche. L'hypothèse de la compensation provient du fait que les aînés les plus performants aient habituellement une activation bilatérale, alors que les aînés ayant de faibles performances ont une activation latéralisée ressemblant à celle des jeunes. En d'autres mots, lorsque la performance moyenne du groupe est équivalente entre les jeunes et les aînés, la sur-activation devrait être corrélée avec les individus ayant les meilleures performances dans le groupe des personnes âgées. La bilatéralisation serait donc un moyen de remédier aux déficits neurocognitifs du vieillissement. Celle-ci a pour impact comportemental mesurable de créer une augmentation des corrélations trouvées entre les différents tests neuropsychologiques pendant le vieillissement, et une augmentation de la variabilité inter et intra-sujet. Tout comme lorsqu'il y a présence de lésion, le vieillissement causerait une restructuration des différentes régions affectées, créant ainsi une compensation. En d'autres termes, il y aurait dédifférenciation des modules fonctionnels auparavant créés pendant le développement cérébral. Ce modèle émet

donc l'hypothèse que chez les personnes âgées, plus l'activation est présente dans les deux hémisphères (donc présence de bilatéralisation), meilleures seront les performances (Reuter-Lorenz & Lustig, 2005).

Malheureusement, les hypothèses découlant du modèle HAROLD ainsi que les tendances générales observées par rapport à l'activation cérébrale des aînés ne fonctionnent pas pour toutes les tâches associées aux lobes frontaux. Cabeza (2002) a basé sa théorie sur les tâches de récupération et d'encodage mnésique, de mémoire de travail et de perception. Il demeure que certaines tâches cognitives de haut niveau ne semblent pas seulement demander une activation unilatérale chez les jeunes adultes, mais bien bilatérale. On note par exemple l'activation de l'inhibition dans la tâche de Stroop, ou encore celle liée à l'alternance (Derrfuss, Brass, Neumann, & Von Cramon, 2005; DiGirolamo, et al., 2001; Jonides, et al., 2000; Leung, Skudlarski, Gatenby, Peterson, & Gore, 2000; MacDonald, Cohen, Stenger, & Carter, 2000; Milham, et al., 2002; Mitchell, 2010; Prakash, et al., 2009; Zysset, Schroeter, Neumann, & Yves von Cramon, 2007). Dans ce cas, le modèle du partage dégressif semble plus approprié pour expliquer les résultats (Logan, et al., 2002). Lors de ces tâches, l'activation cérébrale des aînés âgés de 60 à 73 ans est moindre que chez les jeunes dans l'hémisphère désigné. En conséquence, les aînés ne recruteraient pas efficacement les ressources présentes dans le cortex préfrontal. Il y aurait donc un sous-recrutement des ressources neuronales (Logan, et al., 2002). Par contre, ce sous-recrutement peut être contré en donnant des stratégies d'encodage appropriées aux aînés, recréant ainsi un patron d'activation semblable à ce que l'on rencontre chez les jeunes. Chez les aînés âgés de 73 à 80 ans apparaît une bilatéralisation, et il est difficile d'améliorer leur performance, même avec des stratégies d'encodage spécifiques. La bilatéralisation trouvée ne serait pas une compensation, mais bien une perturbation de la sélection appropriée des régions associées à l'accomplissement de la tâche. Le recrutement deviendrait donc non-sélectif dans les régions associées à la tâche à partir d'un certain âge (Logan, et al., 2002). Contrairement à la prédiction venant du modèle HAROLD, plus le patron d'activation ressemblerait à celui des jeunes, meilleures seraient les performances.

L'hypothèse de la compensation liée aux circuits neuronaux ou *the Compensation-related utilization of neural circuits hypothesis* (CRUNCH) a été établie à partir de l'observation qu'il y a parfois sur-activation chez les aînés par rapport aux jeunes dans les tâches cognitives, et parfois sous-activation (Reuter-Lorenz & Cappell, 2008; Reuter-Lorenz & Park, 2010). Dans les hypothèses de compensation comme le modèle HAROLD, la sur-activation des régions cérébrales nous indique que ces régions travaillaient plus fort chez les aînés que chez les jeunes, afin de contrer leurs faiblesses. Ces types d'activation n'ont probablement pas une cause unique. Pourtant, certaines études montrent que les aînés ont tendance à activer les mêmes régions cérébrales que les jeunes, mais pour des charges cognitives plus légères (Cappell, Gmeindl, & Reuter-Lorenz, 2010). Au niveau le plus bas de demandes cognitives lors de l'exécution d'une tâche, les personnes âgées sur-activent le cortex préfrontal, pour un résultat équivalent à celui des jeunes au niveau comportemental (Mattay, et al., 2006). Conséquemment, lorsque la demande cognitive est augmentée, les sites préfrontaux activés précédemment ne démontrent pas d'activation additionnelle chez les aînés, contrairement aux jeunes adultes. Leurs performances sont alors moindres (Reuter-Lorenz & Cappell, 2008), parce que le niveau nécessaire d'activation pour atteindre la performance observée chez les jeunes adultes est insuffisant. Ce plafond individuel de ressources disponibles pour l'activation varie selon les antécédents médicaux de la personne, ses propres capacités antérieures, et le niveau d'entraînement physique et cognitif maintenu au cours de sa vie. À travers le modèle de CRUNCH, les auteurs posent l'hypothèse selon laquelle le cerveau vieillissant exigerait davantage de ressources neuronales pour la réalisation d'une tâche. Ces ressources étant limitées, elles risquent de ne pas suffire à l'accomplissement d'une tâche cognitive plus complexe, affectant ainsi le comportement de l'individu. (Reuter-Lorenz & Cappell, 2008).

La théorie de l'échafaudage du vieillissement et de la cognition ou *Scaffolding Theory of Aging and Cognition* (STAC) accompagne le modèle CRUNCH. Elle tient compte des changements neurobiologiques du vieillissement afin d'expliquer le déclin lié à l'âge, mais aussi le haut niveau cognitif maintenu par les aînés malgré tous ces changements (Park & Reuter-Lorenz, 2009). D'après les auteurs, les aînés parviennent à maintenir un tel niveau de fonctionnement grâce à l'engagement continu d'un échafaudage compensatoire, c'est-à-

dire au recrutement de circuits additionnels étayant les structures en déclin, dont le fonctionnement est devenu bruité, inefficace ou les deux. L'activation cérébrale répond aux exigences de la tâche par l'action combinée des circuits défectueux et des circuits compensatoires associés. Cet échafaudage dynamique est la propriété d'un cerveau qui s'adapte à son déclin afin de maintenir la meilleure homéostasie possible (Park & Reuter-Lorenz, 2009). Le niveau du fonctionnement cognitif est alors déterminé par la détérioration neuronale (i.e., atrophie, changements de la matière blanche, amincissement du cortex et diminution de la dopamine et du GABA), la détérioration fonctionnelle (i.e., dédifférenciation des aires cérébrales) et la compensation créée par l'échafaudage (Drag & Bieliauskas, 2010; Park & Reuter-Lorenz, 2009). Ces échafaudages seraient particulièrement proéminents au niveau du cortex préfrontal, reconnu dans plusieurs études pour la sur-activation associée aux tâches (Park & Reuter-Lorenz, 2009). De plus, ils ne se développent pas de façon arbitraire et auraient tendance à se développer dans des structures controlatérales et homologues aux structures touchées par le vieillissement, ou dans les aires adjacentes aux lésions (Park & Reuter-Lorenz, 2009). Une augmentation de l'activation bilatérale ou des structures adjacentes montrerait donc un échafaudage particulièrement efficace. Cet échafaudage pourrait aussi être révélé dans les aires activées par de plus grandes demandes cognitives chez les jeunes adultes.

Les études appuyant le modèle HAROLD et celui du partage dégressif proviennent en grande partie du domaine de la mémoire, et peu d'études ont évalué s'ils peuvent s'appliquer aux changements associés à l'âge au niveau des mécanismes du contrôle attentionnel. Bien que le modèle HAROLD explique en grande partie les résultats des études du vieillissement portant sur la mémoire, les études menées sur l'attention tendent à appuyer la théorie du partage dégressif (voir Erickson, et al., 2007 ; Colcombe, et al., 2005) ou le modèle CRUNCH. Par exemple, après un entraînement cognitif en attention divisée, certaines études font état d'une augmentation de l'asymétrie hémisphérique, associée à une augmentation des performances comportementales et des patrons d'activation plus similaires entre les jeunes et les aînés. Cela pourrait s'expliquer par la construction d'un échafaudage, tel que proposé par STAC. Ceci étant dit, il se peut que différents types d'asymétrie soient associés à chacun des mécanismes du contrôle attentionnel chez les aînés. En considérant les

changements associés au niveau neuronal au cours du vieillissement normal, il serait théoriquement possible de dissocier les mécanismes du contrôle attentionnel de leurs altérations liées à l'âge.

1.2 Contrôle attentionnel

En cognition, plusieurs études montrent un déclin des fonctions exécutives chez les aînés (Grady, 2012; Hedden & Gabrieli, 2004; Park & Reuter-Lorenz, 2009; Reuter-Lorenz, 2002; Reuter-Lorenz & Cappell, 2008; Reuter-Lorenz & Lustig, 2005; Reuter-Lorenz & Park, 2010). Les fonctions exécutives peuvent être définies comme un ensemble de mécanismes élémentaires qui organisent et manipulent l'information entrante, afin d'atteindre des buts et gérer les différentes sources d'informations et/ou tâches (Hedden & Gabrieli, 2004). Elles comprennent, entre autres, les mécanismes de contrôle attentionnel comme l'inhibition, la préparation, l'alternance et l'attention divisée, particulièrement touchés au cours du vieillissement (Bherer, Belleville, & Hudon, 2004; Drag & Bieliauskas, 2010). L'inhibition se définit comme étant la capacité d'empêcher une réponse automatique par la suppression du contenu ou des processus cognitifs précédemment activés, en effaçant les actions sans importance et en opposant une résistance aux processus ou contenus pouvant capturer l'attention (Aron, 2007). Quant à la préparation, il s'agit de la capacité à préparer une réponse motrice afin d'être plus rapide et plus efficace à un moment donné (Bherer, et al., 2004). L'alternance désigne la capacité à déplacer notre attention entre deux tâches (Monsell, 2005), et l'attention divisée, l'aptitude à gérer l'interférence entre deux tâches (Bherer, et al., 2004). De récentes observations aux niveaux comportemental et neurophysiologique témoignent de l'importance de cette approche modulaire pour rendre compte de la complexité des fonctions exécutives dans l'étude du vieillissement cognitif (Fisk & Sharp, 2004; Miyake, et al., 2000; Stuss & Alexander, 2000; Stuss & Knight, 2002). Leur regroupement au sein du fonctionnement cérébral a été appelé contrôle cognitif, puisque leur dissociation et la primauté de leur construit en psychophysiologie n'ont pas encore bien été établies (Lenartowicz, Kalar, Congdon, & Poldrack, 2010). On nomme contrôle cognitif une modulation descendante (*top-down*) des processus cognitifs basés sur les représentations

de haut niveau, telles que les buts ou la planification (Miller & Cohen, 2001). L'approche descendante implique un traitement en aval de l'information en accord avec des buts conscients, où les fonctions d'ordre supérieur optimisent et programment les fonctions d'ordre inférieur (Miller & Cohen, 2001). Bien que ces mécanismes permettent de rendre compte des déficits de contrôle attentionnel associés au vieillissement normal et pathologique (Bherer, et al., 2004), peu d'études ont permis d'identifier les substrats neuroanatomiques de ces mécanismes distincts et de leur dissociation au cours du vieillissement. Un des buts des études présentées dans cette thèse était donc de dissocier neurophysiologiquement les mécanismes de contrôle attentionnel.

Au niveau neurophysiologique, on trouve l'ensemble de ces fonctions dans des régions et réseaux cérébraux pouvant gérer de multiples processus cognitifs, tels que le réseau fronto-pariétal ou le réseau de tâche-positive (Spreng, et al., 2010; Toro, Fox, & Paus, 2008). Le réseau de tâche-positive ou *task-positive network* s'active dans un grand nombre de tâches cognitives dirigées par des éléments externes. Les régions impliquées comprennent celles gérant l'attention et le contrôle cognitif. On compte parmi celles-ci des régions du lobe frontal (le cortex préfrontal dorso-latéral (CPF DL), le cortex préfrontal rostro-latéral et l'insula antérieure, l'operculum frontal), du lobe pariétal (cortex pariétal supérieur et lobes pariétaux inférieurs antérieurs), les champs oculaires frontaux, l'aire motrice supplémentaire, le cortex occipital ventral et le gyrus post-central (Spreng, et al., 2010). Quant au réseau fronto-pariétal, ce dernier a le but plus précis de moduler l'attention et les tâches de mémoire de travail selon une approche descendante. Les régions qui y sont associées incluent l'aire motrice supplémentaire et présupplémentaire [aire de Brodmann (AB) 6], l'insula antérieure bilatérale, les champs oculaires frontaux, le CPF DL, le sillon précentral, le cortex occipital ventral, le thalamus et le cervelet (Toro, et al., 2008). Une méta-analyse (Niendam, et al., 2012) démontre que le réseau du contrôle attentionnel a en commun le réseau d'activation de diverses fonctions exécutives (i.e., alternance, inhibition et mémoire de travail). La méta-analyse montre l'utilisation du lobe préfrontal [CPF DL (AB 9 et 46), le cortex frontopolaire, orbitofrontal (AB 6, 10 et 11) et le cortex cingulé antérieur (AB 24 et 32)], pariétal (supérieur et inférieur ; AB 7 et 40), occipital (AB 19) et temporal (AB 13 et 37), en concordance avec le réseau fronto-pariétal de l'attention.

Bien que ces réseaux fassent appel au CPFDL, il faut aussi noter l'apport du cortex préfrontal ventro-latéral (CPFVL), connu pour être actif lors de la production du langage et du contrôle de la mémoire en lien à la récupération, lorsque activé du côté gauche, ainsi que pour l'inhibition motrice et la mise-à-jour de l'action, lorsque activé à droite (Badre & Wagner, 2007; Levy & Wagner, 2011). Le CPFVL gauche est donc souvent activé dans les tâches d'alternance, où ce qui est récupéré en mémoire verbale doit être contrôlé, puisque les stimuli saillants dans ces tâches ne cessent de changer (Badre & Wagner, 2007). De plus, les règles liées aux contingences du stimulus-réponse y sont emmagasinées et récupérées en collaboration avec le CPFDL (Badre & Wagner, 2007). Par exemple, Bunge, Kahn, Wallis, Miller et Wagner (2003), ont trouvé que des règles complexes causaient une plus grande activation que des règles simples dans le CPFVL gauche. Du côté droit, Levy and Wagner (2011) rapportent dans leur revue de littérature les études montrant que cet endroit régit la capacité à outrepasser les réponses motrices dominantes. Cette région servirait aussi à réorienter l'attention aux événements perceptuels ayant lieu dans le champ attentionnel en cours, d'où son implication lors de tâches où plusieurs événements ont lieu en même temps, tels que les double-tâches (Erickson, et al., 2007). Levy et Wagner (2011) notent aussi que le CPFVL droit possède une fonction analogue à celui de gauche, dans le cas où il peut servir à récupérer l'information visuo-spatiale emmagasinée, plutôt que l'information verbale, associée au côté gauche.

Par rapport aux réseaux cérébraux impliqués dans le contrôle attentionnel (réseau fronto-pariétal et de la tâche-positive), certaines études ont montré un impact du vieillissement. Dans une méta-analyse (Spreng, et al., 2010), les données en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) de nombreuses tâches cognitives appartenant à quatre domaines différents (i.e., perception, encodage en mémoire, récupération en mémoire et fonctions exécutives), ont été compilées afin de déterminer les activations communes à ces tâches chez les jeunes et les aînés. Les résultats révèlent que les aînés recrutent davantage le réseau de la tâche positive dans les quatre domaines mentionnés ci-haut, mais que la connectivité fonctionnelle du réseau demeure inchangée par rapport aux jeunes adultes. Les régions plus recrutées chez les personnes âgées sont les régions frontales dorsales (aire de

Brodmann (AB) 46) et le cortex rostro-latéral préfrontal (AB 10). C'est le niveau de performance relatif aux jeunes adultes qui influencent le recrutement du cortex préfrontal, plutôt que la différence d'âge. Les tâches de nature exécutive ont révélé que les aînés utilisaient davantage le CPFDL droit. De plus, les jeunes adultes auraient une étendue dynamique de recrutement plus grande que celle des aînés. Les jeunes peuvent accomplir des tâches relativement faciles sans faire appel au cortex préfrontal, mais ils présentent une plus grande augmentation que les personnes âgées pour une tâche plus difficile. Il existe aussi une différence en matière de performance. Les résultats de la méta-analyse montrent que les aînés affichant de meilleures performances dans les domaines de l'encodage en mémoire, de la récupération en mémoire et des fonctions exécutives, engagent plus le côté gauche du cortex préfrontal, alors que ceux dont les performances sont moindres tendent plutôt à utiliser le cortex préfrontal droit. Spreng, et al. (2010) démontrent que lors de tâches d'inhibition, l'aire motrice supplémentaire est plus sollicitée chez les aînés que chez les jeunes adultes, en particulier lorsque les performances des aînés sont inférieures à celles des jeunes. En ce qui a trait au réseau fronto-pariétal, la revue de littérature effectuée par Madden (2007) semble aussi indiquer un changement de la composante dorsale de ce réseau. Tel que mentionné précédemment, l'activation des régions frontales augmente avec l'âge, ce qui pourrait être lié à une augmentation de l'approche descendante lors de la complétion de ces tâches.

La présente thèse se concentre sur trois des mécanismes du contrôle attentionnel, soit l'inhibition, l'alternance et l'attention divisée.

1.2.1. Inhibition

L'inhibition, ou résistance à l'interférence, correspond à la capacité d'empêcher une réponse automatique (Braver & West, 2008). Comme les autres fonctions du contrôle attentionnel, elle est particulièrement sensible aux effets du vieillissement (Braver & West, 2008 ; Hedden & Gabrieli, 2004), étant donné les changements structuraux liés à l'âge au niveau des lobes frontaux. Au niveau comportemental, tel que mesuré par les études utilisant la tâche de Stroop, il est rapporté dans de nombreuses études (e.g., Houx, Jolles & Vreeling, 2007) que les personnes âgées sont beaucoup plus lentes que les jeunes adultes. Toutefois,

lorsqu'il s'agit de la vitesse de traitement de l'information, les résultats révèlent que l'inhibition n'est pas affectée spécifiquement par le vieillissement, et que la diminution du temps de réaction observée est due à un ralentissement général (voir Verhaeghen & De Meersman, 1998 ; Verhaeghen, 2011). La tâche de Stroop (Stroop, 1935), l'une des plus populaires pour mieux comprendre l'inhibition, n'échappe pas à cette analyse. Cette tâche requiert d'identifier la couleur de l'encre utilisée pour écrire un mot, correspondant lui-même à une couleur différente. Par exemple, le participant voit le mot BLEU écrit à l'encre rouge, et doit dire rouge afin de répondre correctement à la tâche. Lorsque cette condition incohérente ou d'interférence est comparée à une condition cohérente, où le participant doit lire le mot BLEU écrit en bleu, ou encore avec des mots neutres (e.g., le mot DONC écrit en rouge), la condition d'interférence produit une augmentation du temps de réaction due à l'inhibition d'une action automatique, soit lire le mot.

Bien qu'il semble que les performances des aînés à la tâche de Stroop peuvent être globalement expliquées par le ralentissement général, des différences significatives sont trouvées entre jeunes et aînés au plan de l'imagerie cérébrale (voir chapitre 3). En résumé, les études montrent que les jeunes adultes et les personnes âgées recrutent approximativement les mêmes régions préfrontales lorsqu'ils font face à l'interférence créée par la condition d'interférence de la tâche de Stroop. Par contre, on note une augmentation de l'amplitude de l'activation supérieure chez les aînés dans ces mêmes régions par rapport aux jeunes (voir la méta-analyse de Turner & Spreng, 2012). Bien qu'il soit difficile d'interpréter ces résultats sans tenir compte de la relation entre l'activation et les performances cognitives, il est possible qu'une activation plus importante chez les aînés soit associée à un plus grand effort mental engagé dans la tâche en cours.

1.2.2 Alternance

L'alternance se définit comme la capacité à faire passer son attention d'une tâche à une autre, reconfigurant ainsi les ensembles de consignes (*task-set*) et l'appariement stimulus-réponse stockés en mémoire (Monsell, 2003). Étant donné la grande implication des lobes frontaux dans l'accomplissement des tâches exigeant de l'alternance, elle est aussi

considérée comme l'une des premières fonctions à décliner pendant le vieillissement normal (Braver & West, 2008 ; Hedden & Gabrieli, 2004). La tâche de Stroop modifiée (Bohnen, Jolles, & Twijnstra, 1992) est souvent utilisée en milieu clinique afin de déterminer s'il existe des problèmes d'inhibition et d'alternance, puisque cette tâche modifiée ajoute une condition où le participant doit alterner entre donner la couleur de l'encre d'un mot-couleur et lire ce mot-couleur. Habituellement, on observe que cette condition d'alternance cause une augmentation des temps de réaction lorsque comparée à la condition d'interférence classique (Bohnen, Jolles, & Twijnstra, 1992). Une augmentation des temps de réaction est aussi constatée dans d'autres tâches d'alternance, entre les essais répétés d'une même tâche, et lors des essais où le participant doit passer d'une tâche à une autre (e.g., Rogers & Monsell, 1995).

Contrairement au fait que les changements causés par le vieillissement sur l'inhibition seraient globalement dus au ralentissement général, il semble que l'alternance serait un des mécanismes réellement affectés au cours du vieillissement normal. Les études d'alternance utilisent habituellement deux types de comparaisons dans leurs conditions : 1) une comparaison entre une condition où il y a alternance entre essais et une condition sans alternance (comparaison inter-condition) et 2) à l'intérieur même de la condition (comparaison intra-condition) où il y a alternance, une comparaison entre les essais où les tâches présentées alternent (essais d'alternance) et les essais où la même tâche est répétée plus d'une fois (essais répétés). Les paradigmes d'alternance et comparant de jeunes adultes à des personnes âgées révèlent un plus grand coût lié à l'alternance chez les aînés, tant en ce qui concerne les temps de réactions que l'exactitude (e.g., Verhaeghen & Cerella, 2002 ; Wasylshyn et al., 2011) lors des comparaisons inter-condition. Cette augmentation du coût d'alternance intra-condition chez les aînés est aussi révélée au niveau neurophysiologique (e.g., DiGirolamo et al., 2001). Au niveau de la neuroimagerie, les résultats montrent que lors d'essais d'alternance (où on change de tâche à exécuter), les aînés ne présentent pas de différence d'activation par rapport aux essais répétés (où la même tâche est exécutée). Par contre, on constate chez les jeunes adultes une activation étendue au niveau du lobe frontal lors des essais d'alternance, alors qu'elle est beaucoup plus restreinte lors des essais répétés (voir chapitre 3 pour plus de détails). Cette dichotomie de résultats témoigne d'une difficulté

spécifique des aînés aux essais d'alternance par rapport aux essais répétés, leur recrutement neuronal augmentant selon le contexte de la tâche (soit mémoriser les réponses de plusieurs tâches), avec un coût d'alternance global plus élevé (des réponses plus lentes lors de l'exécution d'une nouvelle tâche, versus une tâche répétée à l'intérieur d'un même paradigme). Ce coût d'alternance global plus élevé serait dû à un besoin additionnel des processus exécutifs de gérer le conflit entre les divers ensembles de tâches, d'inhiber l'ensemble inutile à la réponse de la tâche, et de se remémorer l'ensemble des règles.

1.2.3 Attention divisée

L'attention divisée est l'habileté à bien exécuter plus d'une action à la fois en portant attention à au moins deux conduits d'informations (Pashler & Johnston, 1998). Le déclin de cette habileté au cours du vieillissement normal est reconnu dans la littérature (voir Hartley, Jonides, & Sylvester, 2011 ; Kramer & Madden, 2008 ; Verhaeghen, Steitz, Sliwinski, & Cerella, 2003). La diminution de l'habileté à diviser son attention est d'ailleurs liée à une augmentation des risques, tels que des chutes ou une mobilité réduite (Lundin-Olsson, Nyberg, & Gustafson, 2006 ; Verghese & Xue, 2011). Deux paradigmes expérimentaux sont habituellement utilisés afin d'étudier l'attention divisée : le paradigme de la période réfractaire psychologique [PRP (Vonce, 1948 ; Welford, 1952)] et le paradigme de double-tâche [DT (Kahneman, 1973)].

Dans le paradigme de PRP, on demande aux participants de prioriser l'une des deux tâches à effectuer (e.g., Pashler & Johnston, 1998). Les tâches sont habituellement présentées une à la suite de l'autre et l'intervalle de temps entre celles-ci, ou l'apparition asynchrone des stimuli (SOA), varie de façon aléatoire. Les participants doivent prioriser la première tâche présentée, le délai de réponse à la seconde tâche étant interprété comme preuve de l'effet de la période réfractaire psychologique. Ce délai de réponse à la deuxième tâche suggère qu'à un moment donné, une seule tâche peut être traitée, créant ainsi un goulot d'étranglement (Lien & Proctor, 2002 ; Pashler & Johnston, 1998). Plusieurs études ont comparé les performances comportementales des jeunes et des personnes âgées à partir de ce paradigme (e.g., Allen, Ruthruff, & Lien, 2007 ; Allem, Smith, Vires-Collins, & Sperry, 1998 ; Glass, et al., 2000 ;

Hartley, et al., 2001 ; Hartley & Little, 1999 ; Hein & Schubert, 2004 ; Maquestiaux, Hartley, & Bertsch, 2004). Le déclin des performances des aînés par rapport aux jeunes adultes a été attribué au ralentissement général, à une diminution des habiletés d'attention divisée, et à des stratégies de coordination des tâches et réponses plus prudentes (Glass, et al, 2000). De plus, Hein et Schubert (2004) ont pu conclure à une plus grande interférence chez les personnes âgées lors de phase d'entrée des stimuli, Hartley et Little (1999) ont pour leur part reconnu, lors de tests relatifs au ralentissement général, que seules les réponses motrices témoignent des différences d'âge.

Dans le paradigme de double-tâche, on demande aux participants d'exécuter simultanément les deux tâches présentées (e.g., Bherer et al., 2005 ; Erickson et al., 2007). Le coût relié, soit l'augmentation des temps de réaction par rapport aux deux tâches exécutées une à une, est interprété comme une difficulté du système à gérer ces tâches en même temps, sans pourtant établir qu'à un moment donné, une seule tâche doit être exécutée à la fois. Cette habileté diminuerait avec l'âge, et ce déclin serait dû en partie à une diminution des habiletés de coordination des tâches (voir Fraser & Bherer, 2013 pour un résumé de la littérature).

Bien qu'on croie que les instructions de priorité-simultanéité n'éliminent pas l'interférence entre ces deux tâches (Ruthruff, Pashler, & Hazeltine, 2003), la façon dont celles-ci sont abordées par les aînés, et les différences liées à l'âge causées par les deux paradigmes, sont inconnues, tant au niveau comportemental que neurophysiologique. On peut supposer que les paradigmes demandent une gestion de l'interférence entre les deux tâches lorsque celles-ci apparaissent simultanément ou en rapide succession. On pourrait alors s'attendre à ce qu'une attention portée aux deux tâches ajoute une composante exécutive, puisque le participant doit coordonner l'exécution de ces tâches sans règle prédéfinie. En imagerie, on note que les paradigmes impliquant la priorisation d'une tâche sur une autre créeraient une activation unilatérale frontale droite, alors que les instructions de simultanéité induiraient une activation bilatérale chez les jeunes adultes. Concernant les aînés, de rares études rendent les conclusions difficiles à établir. Les résultats suggèrent néanmoins que lors d'une priorisation égale entre deux tâches, le patron d'activation frontal serait plus étendu chez les aînés que chez les jeunes (voir le chapitre 4 pour plus de détails).

Cette étude tentera donc de dissocier les signatures neurophysiologiques les différents mécanismes du contrôle attentionnel, soit l'inhibition, l'alternance et l'attention divisée, des paradigmes de Stroop et de double-tâche entre de jeunes adultes et les personnes âgées, à l'aide de la spectroscopie proche par infra-rouge fonctionnelle (SPIRf). Bien que les études comportementales nous aient grandement éclairés sur l'impact du vieillissement sur les mécanismes du contrôle attentionnel, il semble que l'imagerie cérébrale pourrait nous donner un plus grand nombre de pistes quant à l'évolution de ces mécanismes au cours du vieillissement. Par exemple, l'imagerie nous permet de voir systématiquement les différences dans les patrons d'activation cérébrale et ce, malgré un manque de différence au niveau des résultats comportementaux. Puisque les mécanismes du contrôle attentionnel sont aussi utilisés lors de la marche et de la conduite automobile, et que lors du vieillissement normal il y a augmentation des chutes et des accidents de la route, il est essentiel de savoir si le contrôle attentionnel peut être étudié avec une technique d'imagerie portable, permettant ainsi à long terme d'étudier des personnes en action.

1.3 Spectroscopie proche par infra-rouge fonctionnelle (SPIRf)

Les premières applications de la spectroscopie proche infrarouge (SPIR) au niveau cérébral ont été réalisées en 1992. La SPIR a depuis fait des bonds de géant (Ferrari & Quaresima, 2012). Cet outil a été développé à partir des recherches sur l'oxymétrie musculaire afin d'appliquer les connaissances liées aux changements physiologiques des muscles au niveau cérébral. Puisque le cerveau est le siège de nombreuses composantes physiologiques associées à des changements dans les propriétés optiques du tissu cérébral, son activité peut être évaluée par des techniques optiques. La technique a gagné en popularité, et le nombre d'études scientifiques publiées utilisant la SPIR afin de mesurer les fonctions exécutives ne cesse d'augmenter.

Les principes de fonctionnement de la SPIR sont basés sur le fait que les tissus humains sont relativement transparents à la lumière proche de la fenêtre spectrale de

l'infrarouge, soit de 650 et 1000 nm. La lumière infrarouge proche est absorbée par des chromophores, soit des composantes avec des pigments, ou dispersée dans les tissus. La lumière infrarouge proche peut pénétrer les tissus humains, puisque le facteur dominant du transport de la lumière dans le tissu est la dispersion (Delpy & Cope, 1997). L'atténuation relativement élevée de la lumière infrarouge proche dans le tissu est due au chromophore principal, l'hémoglobine, soit la protéine transportant l'oxygène et figurant dans les petits vaisseaux de microcirculation, comme les capillaires et les artérioles (Ferrari & Quaresima, 2012). La SPIR peut donc obtenir de l'information concernant les changements d'oxygénation du sang.

Le spectre d'absorption de l'hémoglobine dépend de son niveau d'oxygénation. Avec des diodes émettant de la lumière et du laser à l'intérieur d'une fenêtre spectrale de 650 à 1000 nm, les fibres optiques flexibles peuvent transporter la lumière vers les tissus et la capter de ces mêmes tissus, en suivant la courbe des structures superficielles du cerveau. La profondeur adéquate de la pénétration de la lumière peut être atteinte en éloignant les sources émettrices et les détecteurs, mais cette distance dépend de l'intensité et de la longueur d'ondes de la lumière, de l'âge du sujet et de la région de la tête mesurée (Ekkekakis, 2009; Ferrari & Quaresima, 2012; Hoshi, 2003).

Le niveau d'oxygénation est mesuré grâce aux changements relatifs des concentrations d'oxyhémoglobine (HbO) et de déoxy-hémoglobine (HbR). L'HbO, de couleur rouge vif, est l'hémoglobine chargée d'oxygène dans les globules rouges. De couleur bleu-violet, l'HbR est la forme de l'hémoglobine une fois déchargée de l'oxygène. Leur couleur rend possible de détecter les différentes formes d'hémoglobine avec des longueurs d'ondes différentes, permettant ainsi de comparer les variations de concentrations par rapport au niveau de base (Logothesis & Wandell, 2004). Il semble que l'HbO reflète l'activation cérébrale, mais il se peut que cette composante révèle aussi les variations de pression sanguine ou du flux sanguin de la peau (Obrig & Villringer, 2003). Par contre, les variations de HbR montrent le niveau d'utilisation de l'oxygène et le volume du sang veineux, plutôt que le flux sanguin cérébral (Hoshi, 2003). Ainsi, mesurer les deux chromophores séparément augmente le nombre d'indices d'activation cérébrale, et peut donner des preuves

convergentes avec la littérature en imagerie cérébrale existante. D'ailleurs, cette méthode est basée sur un modèle similaire au phénomène BOLD (*blood oxygenation level dependent*) en IRMf. On note une correspondance entre les résultats en IRMf et en SPIRf (Mehagnoul-Schipper, et al., 2002), dans la mesure où les structures examinées sont en surface.

Les principes de fonctionnement de la SPIRf sont basés sur la théorie que lorsque qu'il y a une activation cérébrale, on note une augmentation du flux sanguin cérébral, soit une augmentation d'HbO et une diminution d'HbR (Suhr & Chelberg, 2012). Le niveau de base d'HbO chez les personnes âgées est habituellement amoindri par rapport aux jeunes (Buckner, Snyder, Sanders, Raichle, & Morris, 2000), étant donné la diminution de la densité capillaire et de la vasodilatation des vaisseaux sanguins (Larsson, et al., 2001). L'imagerie optique reflète donc la santé cardiovasculaire des personnes âgées, alors que les données associées, fortement liées aux facteurs de risque cardiovasculaire (e.g., diabète et nombre d'heures d'activité physique), ont des conséquences sur l'interprétation des données (Suhr & Chelberg, 2012). Les comparaisons directes entre jeunes et aînés sont donc à éviter, puisqu'elles assument que le niveau absolu de la réponse hémodynamique est le même et que leur addition sera équivalente (Buckner, et al., 2000). Une façon de contourner le problème consiste à faire des analyses par régions spécifiques pour chaque groupe, en comparant différentes conditions (Buckner, et al., 2000).

La SPIRf comporte certaines limites. Contrairement à l'IRMf, dont la résolution spatiale est au millimètre près, la résolution spatiale de la SPIRf ressemble beaucoup plus à celle de l'EEG. Une paire de source-détecteur peut couvrir une aire de 2 cm². Le positionnement manuel des sources et des détecteurs peut aussi engendrer des erreurs de position et créer de la variabilité dans ce qui est mesuré entre chaque participant. Puisque la lumière captée ne pénètre qu'à deux ou trois centimètres de profondeur selon la distance entre la source et le détecteur, il est impossible de mesurer l'activation des régions sous-corticales. De plus, l'ampleur de la région corticale mesurée est limitée par le nombre de sources et de détecteurs disponibles. Dans notre cas, cela limite la mesure aux lobes frontaux. La SPIRf a toutefois plusieurs avantages. Son coût d'achat et d'utilisation est bien moindre que celui de l'IRMf. De plus, les participants ne sont pas contraints par la forme du scanner et peuvent

accomplir les tâches en demeurant assis devant l'ordinateur. Il devient donc plus facile de contrôler ce que le participant voit à l'écran, le contenu n'ayant pas à être projeté sur un miroir comme lors des expériences en IRMf. On peut donc s'attendre à ce que les tâches soit légèrement plus écologiques que celles réalisées en IRMf. D'autre part, puisque les participants sont assis et que l'acquisition peut être interrompue pour prendre des pauses, il est possible d'augmenter le nombre de stimuli présentés aux participants au cours d'une même séance. Dans un cas comme le nôtre, où la revue de la littérature indique qu'il n'y aura des différences que dans une région corticale spécifique (ici le lobe frontal), la NIRS semblait une mesure tout à fait appropriée. Le choix de la SPIRf augmente donc la validité externe de l'étude, bien qu'elle en diminue la validité interne. Dans les études de cette thèse, on ne teste pas le caractère écologique de la SPIRf, mais on tente de savoir si la SPIRf donne la possibilité de tester les fonctions exécutives de manière écologique.

1.4 Objectifs

Les **objectifs** de ce projet sont :

- 1) évaluer les corrélats neurophysiologiques de l'inhibition et l'alternance à l'aide de la tâche de Stroop avec l'imagerie optique (article 1);
- 2) évaluer les corrélats neurophysiologiques de l'effet de priorité dans un paradigme de double-tâche avec l'imagerie optique (DT ; article 2);

Les sous-objectifs du projet à réaliser lors de l'exécution des objectifs 1 et 2 :

- a) examiner les différences possibles au niveau des corrélats neurophysiologiques entre les jeunes et les aînés, afin de nous donner plus d'informations quant aux aires cérébrales dans le cortex préfrontal nécessaires au bon fonctionnement des mécanismes du contrôle attentionnel;

- b) examiner les différences possibles au niveau des corrélats neurophysiologiques entre les jeunes et les aînés, afin de trouver comment le déclin cognitif touche chacun de ces mécanismes (dédiﬀérenciation compensatoire ou sous-recrutement).

CHAPITRE II

ENJEUX ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

2.1 Inhibition et alternance

Une révision de la littérature montre que très peu d'études comparent directement l'inhibition et l'alternance afin de démontrer une dissociation fonctionnelle entre ces construits. Les études s'intéressant à l'activation chez les jeunes adultes donnent un support relatif à cette dissociation fonctionnelle et suggèrent que l'inhibition utilise principalement le CPFDL (Derrfuss, et al., 2005; Jonides, et al., 2000; Leung, et al., 2000; MacDonald, et al., 2000; Milham, et al., 2002; Mitchell, 2010; Prakash, et al., 2009; Zysset, et al., 2007), alors que l'alternance solliciterait davantage le CPFVL (e.g., DiGirolamo et al., 2001). Chez les aînés, on remarque une plus grande augmentation de l'activation dans les mêmes aires activées que chez les jeunes adultes dans des conditions d'interférence sollicitant l'inhibition (e.g., Schroeter et al., 2003). De plus, les études utilisant un paradigme d'alternance chez les personnes âgées semblent indiquer que ces dernières activent des régions similaires aux jeunes adultes, mais que l'activation cérébrale est généralement plus diffuse au niveau des régions frontales chez les aînés que chez les jeunes (DiGirolamo, et al., 2001). À partir de ces résultats, il est possible d'inférer que l'inhibition et l'alternance ne produisent pas les mêmes patrons d'activation cérébrale dans les régions frontales, et que ce patron diffère chez les aînés. Afin d'explorer les différences et similitudes liées à l'âge des activations frontales de l'inhibition et de l'alternance, la première étude (article 1) analyse l'activation cérébrale à

l'aide de la SPIRF de jeunes adultes et de personnes âgées, alors que ces derniers complètent une tâche de Stroop modifiée (Bohnen, et al., 1992) incluant une condition d'interférence et une d'alternance.

La tâche de Stroop permet donc l'examen de différents processus cognitifs à l'intérieur d'un même paradigme et, en éliminant les contributions confondantes provenant des processus non-exécutifs et des différences entre les études (e.g., groupes, particularités expérimentales, différences de tâches), peut potentiellement clarifier la contribution des aires cérébrales spécifiques associées à chacun des mécanismes.

Compte tenu des résultats de la littérature, nous avons posé comme hypothèses que :

- 1) L'inhibition sera associée à une activation du CPFDL bilatérale chez les jeunes adultes et les personnes âgées ;
- 2) L'alternance montrera une augmentation de l'activation du CPFVL bilatéral chez les deux populations ;
- 3) L'activation des aînés sera plus étendue que celle des jeunes adultes au niveau du cortex préfrontal et ce, plus spécifiquement pour l'alternance, alors qu'elle devra être globalement équivalente en ce qui a trait aux endroits activés pour la tâche d'inhibition ;
- 4) Les personnes âgées présenteront une plus grande activation que les jeunes adultes dans les conditions non-exécutives.

2.2 Attention divisée

L'attention divisée est généralement étudiée à l'aide de deux paradigmes, soit celui de la période réfractaire psychologique (PRP) et les double-tâches (DT). Les études de PRP évaluent les participants donnant priorité à une tâche par rapport à une autre, alors que dans les paradigmes de DT, les participants se concentrent simultanément sur les deux tâches. Ces paradigmes donnent des résultats divergents, ce qui est peut-être attribuable à une différence d'implication du contrôle attentionnel. En effet, l'exigence de simultanéité augmente les ressources cognitives demandées, une décision devant être établie par rapport à la priorité. En

revanche, lorsque cette priorité est donnée initialement, la personne connaît la tâche à effectuer en premier. Il lui suffit donc d'alterner rapidement entre les deux tâches.

Chez les jeunes adultes, les études utilisant les paradigmes de PRP ont principalement révélé une augmentation de l'activation au niveau du cortex préfrontal droit lorsque les deux tâches doivent être exécutées simultanément (Hartley, et al., 2011; Jiang, 2004; Jiang, et al., 2004), bien que certaines études aient relevé une activation bilatérale (Szameitat, 2002; Schubert and Szameitat; 2003). Au lieu de deux tâches visuelles, ces dernières utilisaient toutefois une tâche visuelle et une tâche auditive. À notre connaissance, une seule étude a comparé les différences liées à l'âge chez les personnes âgées à partir de l'imagerie cérébrale et du paradigme de PRP. Hartley, et al. (2011) dénotent chez les aînés une augmentation plus élevée de l'activation au niveau du cortex préfrontal antérieur droit que chez les jeunes.

Quant aux corrélats neurophysiologiques pouvant être associés à la réponse à deux tâches simultanées avec priorité égale, Dreher and Grafman (2003) ont trouvé que les jeunes adultes présentaient une augmentation de l'activité médiale préfrontale bilatérale, du gyrus frontal supérieur bilatéral et des aires pré-motrices. Quant à l'activation chez les personnes âgées, une étude fait état d'une augmentation de l'activation dans le CPFDL et le CPFVL bilatéraux (Erickson, et al., 2007).

Grossièrement, les résultats des études mentionnées ci-haut démontrent une activation de l'hémisphère droit lors des paradigmes de PRP, tandis qu'on observe une activation bilatérale dans le paradigme de DT. La comparaison des résultats des paradigmes de PRP et DT semble suggérer que les réseaux neuronaux employés dépendent du paradigme. Différents mécanismes de contrôle attentionnel étant impliqués dans les paradigmes, nous pourrions observer une composante additionnelle cérébrale lorsque les deux tâches sont effectuées simultanément, puisque cela ajouterait une composante descendante additionnelle au processus. De plus, les résultats manquent parfois de clarté quant aux différences liées à l'âge lorsque les instructions diffèrent et que les études sont éparées. Ces conclusions demeurent provisoires, car aucune étude n'a évalué l'effet de priorité à l'intérieur du même

paradigme. Afin de déterminer les corrélats neurophysiologiques de l'effet de priorité sur les différences liées à l'âge, un paradigme de DT a été créé où les participants devaient, soit donner priorité à une tâche par rapport à une autre, soit réaliser celles-ci simultanément.

Compte tenu des résultats de la littérature, nous avons posé comme hypothèses que :

- 1) La condition où il faut donner une priorité égale augmentera les demandes au niveau du contrôle exécutif ;
- 2) Cette priorité égale augmentera l'interférence due à la double-tâche tant au niveau neuronal (traduit par une bilatéralité) que comportemental, par rapport à la condition où les participants donnent priorité à l'une des tâches ;
- 3) La condition où le participant donnera priorité à l'une des tâches crée une activation du cortex préfrontal droit ;
- 4) La condition où le participant donnera une priorité égale aux deux tâches crée une activation bilatérale;
- 5) Les aînés présenteront une augmentation des aires activées par rapport aux jeunes dans les deux conditions.

CHAPITRE III

ÉTUDE 1

Référence : Laguë-Beauvais, M., Brunet, J., Gagnon, L., Lesage, F., & Bherer, L. (2013). A fNIRS investigation of switching and inhibition during the modified Stroop task in younger and older adults. *NeuroImage*, 64, 485-495.

A fNIRS investigation of switching and inhibition during the Modified Stroop Task in younger and older adults.

Maude Laguë-Beauvais^{a,b}, Julie Brunet^{b,c}, Louis Gagnon^d, Frédéric Lesage^e & Louis Bherer^{a,b}

^aUniversité du Québec à Montréal, Département de Psychologie, C.P. 8888, succursale Centreville, Montréal, Québec, Canada, H3C 3P8

^bCentre de Recherche de l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal, 4545 Chemin Queen Mary, Montréal, Québec, Canada, H3W 1W4

^cUniversité de Montréal, Département de Psychologie, C.P. 6128, succursale Centre-Ville, Montréal, Québec, Canada, H3C 3J7

^dAthinoula A. Martinos, Center for Biomedical Imaging, Massachusetts General Hospital, 149 Thirteenth Street, Suite 2301, Charlestown, Massachusetts, USA, 02129

^eÉcole polytechnique de Montréal, 2900, boulevard Édouard-Montpetit, Montréal, Québec, Canada, H3T 1J4

3.1 Abstract

Brain imaging studies have reported age-related differences in brain activation for attentional control functions, such as inhibition and task-switching. However, age-related differences in brain activation patterns in more than one attentional control task have rarely been studied in the same group of participants. In this study, younger and older adults completed a modified Stroop task with interference and switching conditions, using functional near infra-red spectroscopy. While interference did not reveal any significant activation of the prefrontal cortex in younger adults, switching produced an increased activation bilaterally in both the anterior dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) and the anterior ventrolateral prefrontal cortex (VLPFC). In older adults, an isolated right and left anterior DLPFC activation was observed even in the non-executive conditions of the Stroop task (color denomination) and the interference condition revealed activation mostly in the posterior left DLPFC and bilateral VLPFC with a small right anterior DLPFC component. Specific to older adults, switching induced an increased activation spread out bilaterally over the prefrontal cortex in the bilateral anterior DLPFC, the posterior left DLPFC and bilateral VLPFC. These results suggest that for both older and younger adults, inhibition and switching are associated with distinct patterns of prefrontal activation and that age-related differences exist in these patterns such that prefrontal activation seems to be more spread out at different sites in older adults.

Keywords: Prefrontal Cortex, Executive Functions, Attention, Aging, Neuroimaging, fNIRS

3.2 Introduction

Several studies have suggested that executive functions decline with normal aging. Executive functions are not a unitary concept and studies with patients that have focal frontal insults (e.g., Stuss and Alexander, 2000), along with behavioral studies using factor analysis and structural equation modeling in normal participants (Miyake, et al., 2000), suggest that executive control relies on a subset of distinct mechanisms such as sustained attention, updating, inhibition and switching. Brain imaging studies also suggest that executive control mechanisms differentially involve specific regions of the prefrontal cortex (e.g., Braver and

West, 2008; Turner and Spreng, 2012) and that there is an age-related decline in executive functions. This decline seems heterogeneous across functions and whether all executive control mechanisms are altered by normal aging remains a matter of debate (Salthouse, Hambrick, & McGuthry, 1998; Turner & Spreng, 2012; Verhaeghen, 2011). Recent attempts to synthesize the literature for inhibition and working memory in neuroimaging revealed a decrease in activation in older adults compared to young adults, but using contrasts that compare the most complex task to a baseline task (Turner & Spreng, 2012). These tasks greatly differed among studies, which increased the risk of potential contribution of the non-executive processes involved. Great differences among task-switching studies, which usually involve only one control task, also limit definitive conclusions. The present study explores brain activation patterns in older and younger adults during inhibition and switching using the modified Stroop task. By involving built-in separate inhibition and task-switching conditions, together with appropriate non-executive conditions, the modified Stroop task provides a convenient way to compare switching and inhibition in older and younger adults and to tease apart the potential contribution of non-executive and executive control mechanisms in brain activation patterns.

Among the executive control mechanisms, inhibition and switching have been identified to play an important role in cognitive decline associated with normal aging (Kramer & Madden, 2008). Inhibition is defined as the capacity to impede an automatic response, while switching is the capacity to change one's attention from one task to another, thus reconfiguring task-sets stored in memory (Braver & West, 2008; Monsell, 2003). These functions have often been documented to be among the first to decline in older adults (Braver & West, 2008; Hedden & Gabrieli, 2004), due to changes in the frontal regions of the cerebral cortex that occur with age (Dennis & Cabeza, 2008; Raz, 2000). Also, recent studies suggest that inhibition would not be impaired in the course of normal aging (see Verhaeghen, 2011).

The modified Stroop task (Bohnen, Jolles, & Twijnstra, 1992) is one of the most widely used in clinical settings to detect deficits in attentional control mechanisms, such as inhibition and switching (Lezak, Howieson, & Loring, 2004). In the classic version of the

Stroop Task (Stroop, 1935), one must identify the color of the ink of a color word which is not congruent with its meaning (e.g., “red” written in blue). Compared with a condition in which a participant must read a word or name the color of a neutral word (not a color-word), the classical interference condition produces an increase in reaction time due to inhibition of an automatic action (reading the word). The modified Stroop task (Bohnen, et al., 1992) adds a switching component to the classic Stroop task. In the switching condition, participants must alternate between naming the color and reading the words. It is typically observed that the switching condition induces an increase in reaction times compared to the classic interference condition (e.g., Rogers and Monsell, 1995).

It has been observed that the deficit often found in older adults when compared to younger adults in the interference condition of the Stroop task can be accounted for by general slowing associated with age, at least when there is a large amount of trials (Verhaeghen & De Meersman, 1998). However, studies using a task-switching paradigm have reported a greater switch cost in normal aging on a behavioral level as well as on a neurophysiological one, irrespective of the amount of items in the condition (DiGirolamo et al., 2001; see Verhaeghen and Cerella, 2002, and Wasylshyn et al., 2011, for a meta-analysis). This suggests a specific deficit of switching in normal older adults. However, to our knowledge, previous studies have never compared older and younger adults in a paradigm that involves both switching and inhibition.

Many studies attempted to identify the cerebral regions recruited during the classic Stroop task (Stroop, 1935). In young adults, functional magnetic resonance imaging (fMRI) studies revealed that compared to a baseline color naming condition, the interference condition induced an increased activation in the anterior cingulate cortex (Gruber, Rogowska, Holcomb, Soraci, & Yurgelun-Todd, 2002; Leung, et al., 2000; MacDonald, et al., 2000; Mitchell, 2010) and in the lateral frontal regions (Brodmann areas (BAs) 6, 9, 44, 45 and 46; Derrfuss, et al., 2005; Jonides, et al., 2000; Leung, et al., 2000; MacDonald, et al., 2000; Milham, et al., 2002; Mitchell, 2010; Prakash, et al., 2009; Zysset, et al., 2007). Even though the increase in activation was bilateral, it appeared to be larger in the left than in the right hemisphere. Although studies of inhibition looking at brain lesions do reveal that the right

inferior frontal cortex is of great importance in this function's circuit (see Aron, 2008; Aron, Robbins, & Poldrack, 2004). Functional near infra-red spectroscopy (fNIRS) studies have found an increase in blood volume in the interference condition when compared to the congruent condition in the right and left frontal lobes (Ehlis, Herrmann, Wager, & Fallgatter, 2005; León-Carrion, et al., 2008; Schroeter, Zysset, Kupka, Kruggel, & von Cramon, 2002). These results are reflected in a meta-analytic review done by Turner and Spreng (2012) by comparing the interference condition to neutral trials in Stroop tasks as well as in other types of inhibition paradigms across studies. The meta-analysis reveals that younger adults activated the DLPFC bilaterally with the left inferior frontal gyrus, supplementary motor area and posterior parietal regions. In young adults, fMRI and fNIRS studies thus suggest that the bilateral prefrontal regions of the cerebral cortex play a critical role during the interference condition of the Stroop task.

Brain imaging studies that compared older and younger adults in the interference condition of the Stroop paradigm reported age-related differences in activation patterns in the prefrontal areas. Using fMRI, Langenecker, Nielson, and Rao (2004) have found that the increased activation in the interference condition compared to the congruent condition (naming color) was larger in older compared to younger adults in the right motor cortex (BA 4), bilateral dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC, i.e., BAs 4, 6, 9 and 46) and bilateral ventrolateral prefrontal cortex (VLPFC; i.e., BAs 6, 8, 9, 10 and 47). Zysset, et al. (2007) used fNIRS to compare older and younger adults in the Stroop task. They also found a larger increase in activation during the interference condition in older adults in the left DLPFC (BAs 6/9) and in the left inferior frontal gyrus (BA 6). Prakash, et al. (2009) showed similar results, but with the added component that older adults did not show increased recruitment in the frontal regions with increased task difficulty. However, using fMRI, Milham, et al. (2002) have found that younger and older adults showed an equivalent increase in activation in the interference condition in the inferior frontal gyri (bilateral BA 9, left BA 45 and right BA 44/45). Milham, et al. (2002) also report a greater and more systematic activation in the interference condition in younger compared to older adults in the bilateral DLPFC (left BAs 10, 9 and 6 and right BAs 6 and 9), indicating a decrease in responsiveness in aging. Furthermore, a fNIRS study (Schroeter, Zysset, Kruggel, & Von Cramon, 2003) found that

the oxy-hemoglobin and deoxy-hemoglobin response of older adults in the lateral prefrontal cortex diminished at all sites in the interference condition. However, the interference condition induced a larger activation for the bilateral supplementary premotor areas (BAs 6 and 8) and bilateral inferior frontal gyrus (BA 45) in older adults compared to younger adults. In the meta-analysis by Turner and Spreng (2012), results reveal that older adults engage the right inferior frontal gyrus (BA 9) and the left medial superior frontal gyrus (BA 6) more than the younger adults during the interference condition. The results reported so far thus suggest that older and younger adults do seem to recruit the same prefrontal regions to manage interference in the Stroop task, but that the increase in activation tends to be larger in older adults in some studies (Turner & Spreng, 2012; but see Milham et al., 2002 and Schroeter et al., 2003 for different results).

Task-switching studies comparing younger and older adults found that both populations engage the parietal cortex similarly and the anterior cingulate cortex when doing task-switching (DiGirolamo, et al., 2001; Gold, Powell, Xuan, Jicha, & Smith, 2010). Thus, only frontal activation will be discussed in the following lines. Several studies with younger adults only showed that the switching condition induced an increased activation in many brain regions including the bilateral middle and superior frontal gyrus and the opercularis gyrus (BAs 8, 9, 44 and 6), the right hemisphere in the triangularis gyrus and the anterior middle frontal gyrus (BAs 45 and 46), the parietal lobe (BAs 39, 40 and 7) and the anterior and posterior cingulate cortices (Brass & von Cramon, 2002; Braver, Reynolds, & Donaldson, 2003; Derrfuss, et al., 2005; Dove, Pollmann, Schubert, Wiggins, & Yves von Cramon, 2000; Dreher & Grafman, 2003; Dreher, Koechlin, Ali, & Grafman, 2002; Gold, et al., 2010; Hakun & Ravizza, 2012; Hampshire & Owen, 2006; Kimberg, Aguirre, & D'Esposito, 2000; MacDonald, et al., 2000; Rushworth, Hadland, Paus, & Sipila, 2002; Sohn, Ursu, Anderson, Stenger, & Carter, 2000; Yeung, Nystrom, Aronson, & Cohen, 2006). Neuropsychological evidence from lesion studies also reveals engagement of the left middle frontal gyrus in task-switching, which is corroborated with the imaging studies cited above (Mecklinger, Von Cramon, Springer, & Matthes-von Cramon, 1999; R. Rogers, et al., 1998). It has been suggested that the anterior cingulate cortex is involved in performance monitoring, while shifting between attentional sets or stimulus-response mapping requires

the contribution of the parietal lobe and the supplementary premotor area (Brass & von Cramon, 2002; Yeung, et al., 2006). It is not clear whether the middle frontal gyrus is associated with a specific task or whether it has a specific role in cognitive control (Yeung, et al., 2006), although Gratton, Wee, Rykhlevskaia, Leaver, and Fabiani (2009) suggest that it might be used in preparation for switching between tasks.

Neuroimaging studies of task-switching comparing younger and older adults are scarce. One study (Gold, et al., 2010) found that younger adults were the ones showing an extended activation over certain regions, while older adults recruited extra regions, such as the left middle temporal cortex (BA 22) and the right anterior prefrontal cortex (BA 45). In another study (DiGirolamo, et al., 2001) that compares brain activation during switching in younger and older adults, task-switching trials show a bilateral activation of the VLPFC (BAs 45 and 47) and the median frontal cortex (BAs 6 and 32) in both younger and older adults. However, in older adults, a large activation in frontal regions was also observed in repeated non-switch trials, which do not require switching between tasks. Consequently, no contrast was found for older adults when comparing task-switching trials to repeated trials, as opposed to younger adults. There would seem to be a difficulty for older adults to manage switching conditions as shown by a larger neural recruitment due to the task context (i.e., holding the responses of many tasks in mind) and to a higher global switch cost (i.e., slower responses when doing a new task vs. a repeated task within the same paradigm due to the added need for executive processes to manage the conflict from multiple task sets, inhibiting the unnecessary set and to maintain all different rules) when compared to younger adults (DiGirolamo, et al., 2001). At the physiological level, the cerebral activation being equivalent for repeated trials and task-switching trials could be explained by the fact that older adults recruit the frontal regions in a compensatory manner in the non-switching condition, leaving less neuronal resources to deal with new executive demands. Such pattern of activation has been observed in other studies not using a switching paradigm and has been interpreted in line with the Compensation-Related Utilization of Neural Circuits Hypothesis (CRUNCH; (Reuter-Lorenz, 2002; Reuter-Lorenz & Park, 2010)). The CRUNCH model states that older adults recruit more cerebral resources than younger adults to accomplish low-level cognitive tasks, thus compensating when possible. When doing high-level cognitive tasks, this

compensation is no longer possible, causing equivalent or smaller activation in older adults than younger adults (see Grady, 2012).

So far, evidence from brain imaging studies that support the functional dissociation of inhibition and switching are limited. Studies with young participants tend to support a functional dissociation between inhibition and switching and suggest that inhibition mainly involves the DLPFC (Derrfuss, et al., 2005; Jonides, et al., 2000; Leung, et al., 2000; MacDonald, et al., 2000; Milham, et al., 2002; Mitchell, 2010; Prakash, et al., 2009; Zysset, et al., 2007), while the VLPFC would be more solicited during switching (e.g., DiGirolamo et al., 2001). Moreover, a larger increase in activation in older adults compared to younger adults has been reported in inhibition conditions (e.g., Schroeter et al., 2003). Studies in switching with older adults are scarce and put forward that older adults use similar brain regions as younger adults in both tasks, but brain activation generally seems to be more diffused over the frontal regions in older compared to younger adults even in less demanding tasks (DiGirolamo, et al., 2001). This larger increase in activation in older adults appears in the switching and the non-switching conditions in the frontal regions, which implies that the increased activation would not be specific to the switching process (DiGirolamo, et al., 2001) and could only be due to increase demands in working memory (i.e., maintaining more tasks online). Thus, it seems that inhibition and switching involve different brain activation patterns in the frontal regions in older adults. However, care should be taken when interpreting results across studies that use different paradigms. In order to further explore age-related differences and similarities in frontal activation during inhibition and switching in the present study, participants completed the modified Stroop task, which includes both interference and switching conditions. As such, the aforementioned event-related Stroop task allows for the examination of different cognitive processes within the same paradigm and clarifies the contribution of specific brain regions to inhibition and switching by eliminating confounded contributions of non-executive processes. Brain activation patterns were assessed in the frontal lobe using fNIRS, which measured brain activation through relative changes in oxy-hemoglobin (HbO) and deoxy-hemoglobin (HbR) concentrations.

HbO is defined as being the loaded oxygen form of hemoglobin in red blood cells and is bright red. On the other hand, HbR is purple-blue and is the form of hemoglobin without oxygen, once it has been unloaded. Their colors make it possible to be detected with different wavelengths (between 700 nm and 1400 nm), which in turn enables us to read the variations in concentration compared to baseline for both HbO and HbR. This is different from fMRI which is dependent on changes in the ratio between oxygenated and deoxygenated blood and dependent on the composition of the local blood supply, since HbR is paramagnetic and influences the magnetic resonance signal contrary to HbO (Logothetis & Wandell, 2004). According to some, HbO may reflect what we call cerebral activation, but it may also reveal blood pressure or skin blood flow variations (Obrig & Villringer, 2003). However, HbR variations may show the oxygenation and volume of venous blood rather than cerebral blood flow (Hoshi, 2003). Thus, measuring both chromophores separately might lead to more clues as to how cerebral activation operates and can provide converging evidence with the existing fMRI literature. fNIRS also offers many advantages for this type of paradigm, as it offers a relatively good temporal resolution at least equal to fMRI, a non-invasive measurement thus providing a more ecological setting, less movement artifact than fMRI or EEG, and low functioning costs (Ekkekakis, 2009). In addition, fNIRS is more appropriate for a lengthy experiment than fMRI, since participants can remain seated throughout the exercise. The fact that no differences between younger and older adults in the anterior cingulate cortex were expected also favored the choice of this method, since fNIRS has poor depth penetration when capturing brain activation. Based on previous studies reported above, we predicted that inhibition would be associated with bilateral DLPFC activation, while the VLPFC would show increased activation during switching. Activation should show a general increase over the prefrontal regions in older compared to younger adults, especially for inhibition, but should be equivalent in both older and younger adults in switching. Older adults should also show greater activation in the baseline conditions.

3.3 Materials and method

3.3.1 Participants

Twenty-one young adults (13 women and 8 men, 19 to 36 years old) and 19 older adults (16 women and 3 men, 59 to 69 years old) were recruited with institutional review board-approved procedures and completed the experiment. All participants were healthy, had normal-to-corrected vision and were right handed. None of the participants had a history of neurological or psychiatric disorder, color-blindness, a surgery with general anesthesia in the past 6 months, involuntary tremors, epilepsy and drug or alcohol problems. Subjects were not under any psychotropic or beta-blocking medications. Older adults did not show any signs of dementia based on the Mini-Mental State Examination (Folstein, Folstein, & McHugh, 1975 ; cut-off score was 26/30) or severe depression based on the Geriatric Depression Scale (Yesavage et al., 1988; cut-off score was 10/30).

All participants completed two testing sessions. In session one, participants signed a written informed consent and completed a brief neuropsychological examination. The Stroop task was performed during the second session, which was held within a week of the neuropsychological examination. The participants received monetary compensation for their participation.

In order to confirm that our two age groups could be compared, a neuropsychological assessment consisting of eight tests evaluating working memory, attentional span, processing speed, inhibition, flexibility, lexical access and capacity of abstraction was obtained for each participant. Working memory was assessed with the letter–number sequence subtest of the Wechsler Adult Intelligence Scale—Revised (WAIS-R; Wechsler, 1981); the attentional span with the Digit Span subtest of the WAIS, speed of processing with the Symbol Search and the Digit Symbol Substitution subtests of the WAIS-R, as well as part A of the Trail Making Test of the Halstead–Reitan Neuropsychological Test Battery (Reitan & Wolfson, 1985); flexibility with part B of the Trail Making Test; lexical access with the Verbal Fluency Test (Spring & Benton, 1997); and finally, abstraction was assessed with the Similarities and

Matrix Reasoning subtests of the WAIS-R. Demographically corrected standard scores were used where applicable for the analysis.

Demographic variables and neuropsychological performances are reported in Table 3.1. One-way analyses of variance (ANOVAs) were performed on the neuropsychological test measures to see if the groups were equivalent. Younger adults performed better at the Digit Span test, $F(1, 38)=6.35$, $p=.016$, Symbol Search test, $F(1, 38)=70.88$, $p<.001$, Digit Symbol Substitution test, $F(1, 38)=29.78$, $p<.001$, Matrix Reasoning, $F(1, 38)=11.07$, $p=.002$, as well as the Trail Making Tests A, $F(1, 38)=14.50$, $p<.001$, and B, $F(1, 38)=20.17$, $p<.001$. None of the other tests showed a reliable difference between younger and older adults. These patterns are typical of aging (e.g., Bherer et al., 2008).

3.3.2 Behavioral task

The computerized Stroop task used in this study was based on the modified Stroop task used by Bohnen, et al. (1992) and included three practice blocks and four experimental blocks, each containing a few practice trials at the beginning. In the following lines, the term inhibition and task-switching will be used as the names of the cognitive mechanisms, while interference and switching will refer to the different task conditions. Note that all stimuli were presented in French, but were translated in English for the purpose of this article. The three practice blocks included 20 trials each to get familiar with the apparatus and experimental procedure. During practice, participants were asked to name the color of congruent color-words and the fNIRS signal was not recorded during these trials. All sixty trials corresponded to the congruent condition of the Stroop task, in which participants had to name one of four possible words appearing on the screen that had the same color as their meaning; "RED", "BLUE", "YELLOW" or "GREEN".

In the first practice block, participants were asked to read the names of the color-word aloud while giving their answers on the keyboard. A legend appearing on the top of the computer screen reminded them of their color-key mapping. In the second practice block,

participants were asked to answer on the keyboard only and the legend for the color-key mapping remained on the screen. In block three, the color-key mapping did not appear on the screen to make sure participants had memorized it. Throughout the practice visual feedback was provided after each trial, with the words “correct answer” or “wrong answer” appearing on the screen after each trial. After the three practice blocks, participants completed four experimental blocks. The four possible answers (i.e., blue, green, red and yellow) were mapped to the letters “u”, “i”, “o” and “p” on a QWERTY keyboard. All participants answered with their right hand and the response key mapping remained the same throughout the experiment, but was counterbalanced between subjects. For half of the participants, the mapping was “index finger — red”, “middle finger — blue”, “ring finger — green”, and “little finger — yellow”, while the other half used the following mapping : “index finger — yellow”, “middle finger — green”, “ring finger — blue”, and “little finger — red”. Counterbalancing ensured that the finger-key mapping did not bias performance.

The first experimental block consisted in the same congruent condition shown in the practice trials, where participants had to read one of four possible color-words appearing on the screen which had the same meaning as their color: red, blue, yellow and green. This first reading block was used as an additional practice block and was not analyzed. The second block, the color denomination condition, was used as a baseline condition in the analyses. In this block, participants had to identify the color of non-color words, which were “BUT”, “FOR”, “WHEN”, and “THAN”. The third block consisted in a classical Stroop interference condition, which required naming the color of a color-word (“RED”, “BLUE”, “YELLOW” or “GREEN”), for which the semantic meaning of the word was incongruent with the color itself (e.g. the word BLUE written in green). In these first three blocks, a fixation cross appeared in the middle of the screen for 500 ms, followed by the word for 2000 ms. The fourth experimental block consisted in a switching condition which was identical to the interference condition, except for 25% of the trials, which were reading trials. For those trials, a square appeared instead of the fixation cross, and participants were asked to read the color-word, instead of naming its color. The reading trials appeared randomly throughout the block.

3.3.3 fNIRS acquisition and analysis

Participants sat in a quiet, dark room while doing the experiment. In all experimental blocks, an event-related design was used and the inter-trial interval varied randomly from 8 to 16 s, for a mean of 12 s. This delay was used to make sure that the participants' hemodynamic responses were linear with stimuli. Each fNIRS block contained 60 trials and the screen was blank between the trials. In order to make sure that the participants understood, the tasks were practiced before each of the fNIRS blocks. During these five practice trials, the response key-color mapping was presented on the screen and feedback was provided after each trial. Older adults were given 20 additional practice trials for the switching condition. Response times (RT) and hemodynamic responses were recorded. Trials with a wrong answer or no answer at all were taken out of the fNIRS analysis.

Changes in concentration of oxy-hemoglobin (HbO) and deoxyhemoglobin (HbR) were measured by a multichannel, continuous-wave spectrometer (CW5, TechEn Inc., Milford, MA), which emits at 830 nm and 690 nm to measure HbO and HbR, respectively. Two probes, one per hemisphere, were arranged with one central, anterior-posterior row of four optodes per hemisphere. Sixteen detectors were placed strategically 2.8 cm away from the sources, eight of them were dorsal to the sources, while the other eight were ventral, so that each source had four dorsal detectors and four ventral detectors. The two probes were placed symmetrically over the lateral prefrontal cortex and the most anterior and most ventral pair of source-detector of each probe (pair 8) was placed on Fp1/Fp2 using the 10/20 system (Okamoto, et al., 2004). Following that, the 14 source-detector pairs were combined into four different approximate regions of interests (ROI) that do not refer exactly to the underlying brain regions. They consisted of pairs 1 to 4 for the anterior DLPFC (BAs 9, 10 and 46), 5 to 7 for the posterior DLPFC (BAs 6 and 4), 8 to 10 for the anterior VLPFC (BAs 10, 45 and 46) and 11 to 14 for the posterior VLPFC (BAs 4, 6 and 44) for both hemispheres (see Figs. 1 and 2 for results). Parietal activation was not measured given the fact that no age-related differences were expected in that specific region. Variables of interest are relative changes in the concentrations of HbO and HbR compared to baseline, because continuous-wave

technology does not allow quantifying absolute concentrations of HbO and HbR due to the impossibility of measuring optical path lengths (Delpy & Cope, 1997; Hoshi, 2003).

Analysis of diffuse optical imaging data acquired in fNIRS during cognitive tasks has been mainly done using ensemble averages of blocked protocols in the literature. Event-related designs with short inter-stimulus intervals require a distinct method, the general linear model (GLM), in order to separate the contributions from overlapping hemodynamic responses. The GLM has been used extensively in fMRI studies and was introduced recently (Cohen-Adad, et al., 2007) in fNIRS. One of the key aspects of this method is the role played by the drift functions modeling physiological noise. Because of the event-related design of the experiment presented in this paper, this approach has been used instead of traditional fNIRS filtering and averaging analysis techniques.

The raw data were first demodulated and downsampled to 10 Hz, then no further filtering was done. The measured changes in photon fluence, reflecting changes in tissue attenuation of light, were converted to changes in chromophore concentration using the modified Beer-Lambert law (Cope, et al., 1988). Furthermore, a multiplicative factor of 50 was applied to the computed concentration changes to account for the partial volume effect of absorption changes over the probed region (Strangman, Franceschini, & Boas, 2003).

The GLM was then applied to estimate the functional response. For each distinct event, a stimulus vector was constructed and convolved with a canonical hemodynamic response function taken from the SPM software which has been shown to be adequate for diffuse optical imaging (Huppert, Hoge, Diamond, Franceschini, & Boas, 2006). The drift components in the signal were modeled using a set of discrete cosine transform functions with a cut-off frequency of 0.05 Hz (Cohen-Adad, et al., 2007). The residual noise was assumed to be Gaussian and a Bayesian estimation of the response was finally performed for each event and chromophore (HbO and HbR).

3.3.4 Statistical analysis

Behavioral and fNIRS data were analyzed using PAWS v. 18.0 statistical software for Windows. For the modified Stroop task, RT and accuracy data were analyzed using a 2 (age) \times 3 (conditions) mixed subject design. Follow-up analyses were conducted with pairwise comparisons using least significant different (LSD) correction.

For behavioral data, analyses were also performed on a computed inhibition cost (interference condition–denomination condition) and a switch cost (switching condition–denomination condition). Behavioral RT costs were analyzed using a mixed design ANOVA with age group as the between-subject factor and costs (inhibition and switch) as the within-subject factors.

The fNIRS data analysis was conducted on the concentration associated with the activation of each condition. Given that anatomical and physiological changes that occur with age can alter tissue diffusion properties, which can bias measurements, older and younger adults were not compared directly, because the differential path length factor (DPF) properties are currently unavailable for adults over 50 years old (Duncan, et al., 1996). As reported in Raz, Ghisletta, Rodrigue, Kennedy, and Lindenberger (2010) many changes occur in normal aging, such as smaller brains and thinner cortices, with shrinkage being greater in the tertiary association cortices, the neostriatum, and the cerebellum, while the primary visual cortices show much smaller changes. The DPF varies depending on the light scatterers and absorbers in tissues, such as the skull, the brain density and skin (Duncan, et al., 1996). The changes may also be linked to differences in cerebral blood volume, for which PET studies have shown a decrease of 0.5% per year (Leenders, et al., 1990). The amount of hemoglobin that is absorbed must be proportional to the cerebral blood volume. When it drops, it causes an increase in the number of photons detected and the length they have traveled, thus increasing the mean path length and the DPF will be larger.

ANOVAs were performed on concentration variations separately for HbO and HbR. The ANOVA model involved 3 (Conditions) within-subject factors for each of the 14 pairs measured. Follow-up analyses were performed using pairwise comparisons with LSD correction. Missing data for both behavioral (amount=2.5%) and imaging (amount=5.7%) variables were replaced by the mean of the appropriate age group. Only significant results are reported.

3.4 Results

3.4.1 Behavioral results

3.4.1.1 RT

The analysis revealed a main effect of Condition, $F(2, 76)=388.78$, $p<.001$, $\eta^2=.91$, and Age, $F(1, 38)=40.57$, $p<.001$, $\eta^2=.52$, and a significant Age \times Condition interaction, $F(2, 76)=4.53$, $p=.01$, $\eta^2=.11$. Pairwise comparisons showed that older adults were slower in all conditions ($p_s<.01$) and that for both age groups, RTs significantly differed from one condition to the other ($p_s<.001$; see Table 3.2), i.e., the RTs were faster in the denomination condition than the interference and switching conditions and RTs of the interference condition were significantly faster than the switching condition.

Cost analysis revealed a main effect of Cost Type, $F(1, 38)=372.00$, $p<.001$, $\eta^2=.91$, the inhibition cost being smaller than the switch cost. There was also a main effect of age, $F(1, 38)=405.82$, $p<.001$, $\eta^2=.17$, due to larger inhibition and switch costs in older than younger adults.

3.4.1.2 Accuracy

A main effect of Condition, $F(2, 76)=79.82$, $p<.001$, $\eta^2=.68$, as well as a main effect of Age, $F(1, 38)=32.08$, $p<.001$, $\eta^2=.46$, were found. Pairwise comparisons showed that both age groups showed lower accuracy in the switching condition compared to the two other conditions ($p<.001$; see Table 3.2). An Age \times Condition interaction was also found, $F(2, 76)=28.75$, $p<.001$, $\eta^2=.43$, and pairwise comparisons showed that older adults

produced more errors than younger adults in the interference condition ($p=.04$), as well as in the switching condition ($p<.001$). In addition, this interaction revealed that only older adults had lower accuracy in the interference condition compared to the denomination condition ($p=.03$).

An interaction was also found between Age and Cost Types, $F(1, 38)=26.66$, $p<.001$, $\eta^2=.68$. Group difference in inhibition cost did not reach a significant level ($p=.071$), but older adults showed a larger switch cost than younger adults ($p<.001$). Note that the inhibition cost was smaller than the switch cost for both younger adults ($p<.01$) and older adults ($p<.001$).

3.4.2 fNIRS data

Raw fNIRS data are shown in Table 3.3 for younger adults and in Table 3.4 for older adults.

3.4.2.1 Younger adults

Fig. 3.1 shows condition-related changes in activation (HbO and HbR) for younger adults. Significant differences in HbO between conditions were observed for pair 3 (anterior DLPFC) in the left hemisphere, $F(2, 40)=3.99$, $p=.03$, $\eta^2=.17$. Pairwise comparisons showed a greater HbO concentration in the switching condition than both the denomination ($p=.04$) and the interference condition ($p=.03$).

A significant condition effect was also observed in the HbR concentration for pair 5 (posterior DLPFC) in the right hemisphere, $F(2,40)=3.92$, $p=.03$, $\eta^2=.16$, with pairwise comparisons showing a greater change in HbR in the switching condition than the denomination condition ($p=.04$). In the left hemisphere, a main effect of condition was found for pair 9 (anterior VLPFC), $F(2, 40)=4.00$, $p=.03$, $\eta^2=.17$, due to a larger concentration change in the switching condition than the denomination condition ($p=.006$), and for pair 10 (anterior VLPFC), $F(2, 40)=7.28$, $p=.002$, $\eta^2=.27$, where a greater concentration change was

observed in the switching condition compared to both the denomination ($p=.002$) and the inhibition conditions ($p=.02$).

3.4.2.2 Older adults

Condition-related changes in HbO and HbR observed in older adults are depicted in Fig. 3.2. In the right hemisphere, HbO concentration changed as a function of condition in pair 2, $F(2, 6)=34.06$, $p<.001$, $\eta^2=.65$, pair 3, $F(2, 36)=37.09$, $p<.001$, $\eta^2=.67$, and pair 13, $F(2,36)=3.26$, $p=.05$, $\eta^2=.15$. In pair 2 (anterior DLPFC), the denomination condition showed a higher HbO concentration change than the interference ($p<.001$) and the switching conditions ($p<.001$). In pair 3 (anterior DLPFC), HbO increase was larger in the switching condition ($p<.001$) and the interference condition ($p<.001$) compared to the denomination condition. For pair 13 (posterior VLPFC), the interference condition also induced a larger HbO concentration change than both the denomination condition ($p=.05$) and the switching condition ($p=.04$). In the left hemisphere, a main effect of condition was found for pair 3 (anterior DLPFC) only, $F(2, 36)=5.47$, $p=.008$, $\eta^2=.23$, and pairwise comparisons revealed that the switching condition had a greater concentration change than the denomination condition ($p=.02$) and the interference condition ($p=.004$).

In HbR, two pairs showed main effects in the right hemisphere, i.e., pair 12, $F(2, 36)=4.43$, $p=.02$, $\eta^2=.20$, and pair 13, $F(2, 36)=3.72$, $p=.03$, $\eta^2=.17$. For pair 12 (posterior VLPFC), pairwise comparisons revealed a significant difference for the interference ($p=.02$) and the switching ($p=.01$) conditions compared to the denomination condition. For pair 13 (posterior VLPFC), the interference condition ($p=.04$) and the switching condition ($p=.01$) showed a larger concentration change in HbR compared to the denomination condition. In the left hemisphere, main effects were found for pair 3, $F(2, 36)=5.36$, $p=.01$, $\eta^2=.23$, pair 6, $F(2, 36)=5.33$, $p=.01$, $\eta^2=.23$, pair 7, $F(2,36)=4.61$, $p=.02$, $\eta^2=.20$, pair 8, $F(2, 36)=5.52$, $p=.01$, $\eta^2=.24$, pair 12, $F(2, 36)=3.68$, $p=.04$, $\eta^2=.17$, and pair 13, $F(2, 36)=9.12$, $p=.001$, $\eta^2=.34$. In pair 3 (anterior DLPFC), the denomination condition showed a larger HbR concentration change than the interference condition ($p=.004$). In some cases, the interference condition was associated with a larger change in HbR than the denomination condition, i.e., pair 7 (posterior DLPFC; $p=.07$) and pair 12 (posterior VLPFC; $p=.05$). With regard to the

switching condition, pairwise comparisons revealed a larger change in HbR concentration compared to the denomination condition in all pairs ($p < .05$) and a larger change in HbR than the interference condition in pair 3 (anterior DLPFC; $p = .01$), pair 8 (anterior VLPFC; $p = 0.5$) and pair 13 (posterior VLPFC; $p = .04$).

3.5 Discussion

The present study compared functional brain activation patterns in the prefrontal cortex in older and younger adults during inhibition and switching using fNIRS and a behavioral paradigm that involved built-in conditions, namely the modified Stroop task. Our results suggest that inhibition and switching are associated with different functional activation patterns in the frontal subregions, which brings further support to the notion that inhibition and switching are distinct attentional control mechanisms (Miyake, et al., 2000; Stuss & Alexander, 2000). The different patterns of activation in older and younger adults observed in the present study also support age-related differences in executive control mechanisms.

Behavioral results of the present study suggest that older and younger adults responded more slowly and less accurately in tasks involving executive functions, such as inhibition and task-switching, compared to the baseline condition (denomination). Moreover, older adults produced slower responses than younger adults in all conditions of the task. As expected, the inhibition cost was smaller than the switch cost for both younger and older adults in RT and accuracy. Moreover, inhibition and switch costs were larger in older compared to younger adults in RT. In accuracy, only the switch cost was greater in older adults than in younger adults. In line with previous studies, these findings suggest a general slowing of RT in older adults, along with a larger age-related deficit in task-switching (e.g., Andres, Guerrini, Phillips, & Perfect, 2008; Bugg, DeLosh, Davalos, & Davis, 2007; Davidson, Zacks, & Williams, 2003; Smith, et al., 2001; Verhaeghen & De Meersman, 1998).

As for the fNIRS results, changes in brain activation patterns observed in younger adults suggest that the subregions of the prefrontal cortex are differentially involved in task-

switching, while activation patterns in the prefrontal regions do not differ between denomination and inhibition conditions. During switching there was an anterior frontal component in the left hemisphere, including the involvement of the DLPFC (pair 3 — HbO) and VLPFC (pairs 9 and 10 — HbR), and a smaller component in the DLPFC of the right hemisphere (pair 5 — HbR). These results are in line with previous studies using fMRI that showed that in addition to the DLPFC, the VLPFC plays a critical role in task-switching (Brass & von Cramon, 2002; Derrfuss, et al., 2005; DiGirolamo, et al., 2001; Dove, et al., 2000; Hampshire & Owen, 2006; Wylie, Javitt, & Foxe, 2004; Yeung, et al., 2006) and that this dorsal-ventral dichotomy is sometimes more pronounced in the left than in the right hemisphere (Braver, et al., 2003; Dreher & Grafman, 2003; Kimberg, et al., 2000; MacDonald, et al., 2000; Rushworth, et al., 2002).

The fact that there was no difference between the interference condition and the denomination condition in younger adults goes against what was found in previous studies in which inhibition was associated with greater contribution of the DLPFC (e.g., Ehlis, et al., 2005; Jonides, et al., 2000; León-Carrion, et al., 2008; Leung, et al., 2000; MacDonald, et al., 2000; Milham, et al., 2002; Schroeter, et al., 2002; Turner & Spreng, 2012; Zysset, et al., 2007). One potential explanation for this is that the task used in the present study might have been taxing working memory too much in order to remember the actual response mapping on the keyboard in both conditions to really provide a difference in activation. However, results observed in older adults do not support this. In fact, older adults that typically show working memory deficits did show activation differences between denomination and inhibition. In older adults, the denomination condition led to increased activation in the right anterior DLPFC (pair 2) for HbO compared to the interference and switching conditions and a greater HbR concentration change in the left anterior DLPFC (pair 3). This activation pattern was not observed in younger adults and suggests that for older adults, the non-executive conditions of the task led to an activation pattern similar to the one observed in the executive condition (switching) in younger adults. For example, there was a larger HbR activation in the switching condition than in the denomination condition in younger adults in the right DLPFC, posteriorly to the concentration change in the denomination condition in older adults.

For inhibition in older adults, there also seem to be isolated components of activation in the right posterior VLPFC (pair 13) for HbO coupled with a decrease in HbR concentration in the same area (pairs 12 and 13) and an increase of concentration change in HbO in the right anterior DLPFC (pair 3). In the left hemisphere, the HbR concentration changes were in the posterior prefrontal cortex in both the posterior DLPFC (pair 7) and VLPFC (pair 12).

In the switching condition, there was a larger HbO concentration change in the left (pair 3) and the right (pair 3) anterior DLPFC in older adults when compared to the denomination condition. The left anterior DLPFC (pair 3) HbO concentration change was coupled with an HbR concentration change in the same region (pair 3). Moreover, there was an HbR concentration change component in the right VLPFC (pairs 12 and 13) in the same pair as the inhibition component as mentioned above, suggesting common networks of activation for both inhibition and switching in the right hemisphere. Nevertheless, the HbR concentration changes for switching were broader than those of the inhibition changes in the left hemisphere, covering concentration changes in the anterior and posterior DLPFC (pairs 3, 6 and 7) as well as the VLPFC (pairs 8, 12 and 13), which points towards a greater involvement of the prefrontal cortex in the switching condition. Thus, it is clear that brain activation during the switching condition was more spread out in the left hemisphere over the prefrontal cortex for older adults when compared to younger adults for HbR. These results are in agreement with previous fMRI studies using switching tasks in older adults, which points towards an increase of activation in both hemispheres in the anterior VLPFC (BAs 45 and 46) in older adults when compared to younger adults (DiGirolamo, et al., 2001).

In line with previous fMRI and fNIRS studies, results of the present study suggest differences and similarities between older and younger adults in brain activation pattern during inhibition and switching. In the inhibition condition, there was no difference in HbO concentration among the prefrontal subregions in younger adults, while small left anterior DLPFC and bilateral posterior DLPFC and VLPFC involvements were observed in older adults. In the switching condition, there was a bilateral activation in the anterior prefrontal cortex in younger adults although with left side prevalence, in contrast to older adults that

showed wider bilateral brain areas to perform the same task. The HbR concentration results in the switching condition for older adults were found to be significantly lower than those of the denomination condition in many pairs, something that younger adults did not show, as results were localized in two pairs in the left hemisphere and one in the right. Globally, these results suggest that inhibition and task-switching are differentiated by a lack of concentration change for inhibition for younger adults and a greater use of frontal resources for task-switching in the older adult population.

Different neurophysiological hypotheses attempt to explain the differences in brain activation between older and younger adults, but none has been really satisfactory in explaining age-related changes in executive functioning and attention. The under-recruitment and non-selective recruitment hypotheses state that older adults do not recruit resources effectively, failing to resolve competition among brain regions and leading to a diffuse activation of lesser amplitude compared to younger adults (Logan, et al., 2002). This model holds in the Compensation-Related Utilization of Neural Circuits Hypothesis [CRUNCH; (Reuter-Lorenz & Cappell, 2008; Reuter-Lorenz & Park, 2010)]. At the physiological level, the cerebral activation being equivalent for the denomination and interference trials may be linked to compensatory frontal recruitment in older adults in non-executive conditions, leaving less neuronal resources to deal with new executive demands, as predicted by the CRUNCH hypothesis. However, in the present study older adults engaged more prefrontal regions while using the task-switching mechanism, as if an added executive component boosted the demands of the prefrontal cortex and more resources actually became available. This observation does not fit in the predictions of the CRUNCH model. However, the Scaffolding Theory of Aging and Cognition [STAC; (Park & Reuter-Lorenz, 2009)] proposes that increased brain activity with age, particularly in the frontal cortex, can be explained by additional circuitry built with age as the brain reorganizes itself due to increased plaques, tangles and general shrinkage. The dedifferentiation of the activation found in the task-switching mechanism with the poorer behavioral performance in older adults gives weight to this last model. Also, given the fact that the switching task was associated with prevalent activation in the left hemisphere (although bilateral) in younger adults and almost equally distributed between both hemispheres in older adults, it would seem that the pattern could

also partially fit the hemispheric asymmetry reduction in older adults (HAROLD) model. This model states that normal aging is accompanied by a decrease in the lateralization of activation found in tasks that involve the frontal cortex, such as working memory or episodic memory tasks (Cabeza, Anderson, Locantore, & McIntosh, 2002). Results of the present study do not provide a strong support to this model. In fact, while increased bilateral activation is observed in older adults, this was observed in brain regions that also showed task related activation in younger adults.

Because of the limited depth penetration of lights, which is an inherent limitation of fNIRS, we could not observe any activation in the anterior cingulate cortex, as often reported in switching studies (Delpy & Cope, 1997; Hoshi, 2003). Moreover, switching studies usually report activation in the parietal cortex (Brass & von Cramon, 2002; Braver, et al., 2003; Dove, et al., 2000; Dreher & Grafman, 2003; Dreher, et al., 2002; Kimberg, et al., 2000; MacDonald, et al., 2000; Rushworth, et al., 2002; Sohn, et al., 2000; Yeung, et al., 2006), but because of optode positioning, activation in that specific region could not be assessed in the present study. However, no age difference was found in previous task-switching studies for that specific region (DiGirolamo et al., 2001). Only one study to our knowledge, using diffuse tensor imaging, suggests that age-related slowing might be due to the diminished state of frontoparietal white matter connection (Gold et al., 2010). However, lack of whole brain sampling remains a technical limit in this study.

In summary, results of the present study showed that inhibition and task-switching are associated with distinct patterns of prefrontal activation supporting the notion that these are two functionally distinct executive control mechanisms. Moreover, age-related differences observed in brain activation patterns during inhibition and switching also suggest that the two mechanisms are differentially altered in the course of normal aging.

3.6 Funding

This work was supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (grant number 298918-2009) and the Canadian Institutes of Health Research (grant number 200610SIA-170467-162735).

3.7 Acknowledgments

We thank Mathieu Coursolle, M.Sc., and Mathieu Dehaus, Ph.D., for their help in programming and Nathalie Castonguay, B.Sc. for helping in the testing phase. Thanks to Patrick Roy for helping with the final verifications.

3.8 Tables

Table 3.1

Demographic variables and performances in neuropsychological tests for both younger and older adults.

Measure	Young (n=21)	Old (n=19)
Age	24.38 (4.47)	64.00 (3.40)
Education	16.00 (2.37)	14.37 (3.17)
Health rating	4.37 (0.50)	4.15 (0.62)
MMSE	N/A	29.00 (1.15)
GDS	N/A	4.16 (4.52)
Ishihara Tests for Colour-blindness (5 plates)	5.00 (0.0)	5.00 (0.0)
Working memory		
Letter-Number Sequence (raw scores)	11.38 (2.40)	10.00 (2.31)
Attentional span		
Digit Span (raw scores)	17.52 (4.00)	14.68 (3.00)*
Speed processing		
Symbol Search (raw scores)	42.95 (6.90)	27.05 (4.72)*
Digit Symbol Substitution Test (raw scores)	90.67 (11.41)	69.68 (12.91)*
Abstraction		
Matrix reasoning (raw scores)	20.33 (3.12)	15.53 (5.76)*
Similarities (raw scores)	22.81 (3.76)	21.16 (5.80)
Attention and executive functions		
Trail Making A (time in seconds)	26.88 (10.00)	40.21 (12.13)*
Trail Making B (time in seconds)	51.62 (13.61)	74.68 (18.68)*
Verbal Fluidity (number of words)	46.24 (11.92)	45.05 (14.44)

Standard deviations are in parentheses. *Statistically significant with $p < .05$.

Table 3.2

Reaction times (ms) and accuracy (% of correct responses) for younger and older adults in the four conditions of the modified Stroop task.

Conditions	Young (n=21)		Old (n=19)	
	RT	Accuracy	RT	Accuracy
Denomination	715.92 (123.04)	97.76 (2.02)	886.17 (91.88)*	96.69 (2.82)
Interference	807.89 (131.27)	98.00 (2.43)	1033.58 (99.43)*	94.44 (7.00)*
Switching	1090.01 (158.34)	92.76 (5.25)	1353.26 (115.67)*	75.37 (10.99)*
Interference Cost	91.97 (76.46)	0.24 (2.19)	147.42 (102.28)*	-2.25 (5.69)*
Switching Cost	374.09 (111.40)	-5.00 (5.80)	467.09 (98.99)*	-21.32 (10.66)*

Standard deviations are in parentheses. *Statistically significant between younger and older adults with $p < .05$.

Table 3.3

Mean hemodynamic response (μM) variations observed at each of the 14 pairs of both hemispheres during the four conditions of the Modified Stroop Task in younger adults

Pairs	Younger Adults											
	Denomination				Interference				Switching			
	Right Hem.		Left Hem.		Right Hem.		Left Hem.		Right Hem.		Left Hem.	
HbO	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR	
1	4.45±7.47	-0.05±1.36	4.10±7.33	-0.12±1.58	4.82±6.06	-0.93±2.01	3.85±5.62	-0.33±1.97	4.23±6.26	-0.87±1.37	3.87±5.83	0.09±1.07
2	6.29±9.63	-0.52±1.60	4.33±7.53	-0.47±1.55	5.71±6.61	-0.95±2.17	4.98±4.93	-1.03±2.55	6.42±6.38	-0.89±1.18	6.15±6.80	0.04±1.22
3	3.57±4.50	-0.28±1.17	3.77±4.94	-0.05±1.14	4.11±6.52	-0.42±2.00	3.95±6.40	-0.82±1.92	6.09±4.14	-0.52±1.77	7.50±6.29	0.06±1.62
4	3.25±6.99	-0.50±1.51	2.67±3.77	0.03±1.27	2.14±5.82	-0.39±2.07	3.29±4.73	-0.45±1.85	3.86±6.41	-0.76±1.74	5.69±6.55	-0.39±1.55
5	2.77±3.83	-0.16±1.71	2.43±3.87	0.47±1.23	2.31±4.01	-0.69±1.34	1.61±3.03	-0.44±1.23	3.21±5.45	-1.36±1.38	2.03±4.25	-0.38±1.80
6	2.43±3.87	-0.39±1.38	0.73±4.15	0.03±1.46	1.61±3.03	-0.48±1.33	-0.40±6.75	0.01±1.07	2.03±4.25	-0.93±1.50	-1.05±7.72	-0.86±1.76
7	0.01±5.40	-0.86±1.10	1.25±4.12	-0.43±1.10	0.44±3.42	-0.90±1.37	0.46±4.28	-0.87±2.67	0.54±5.75	-0.51±1.32	-0.04±3.76	-0.54±1.38
8	2.49±6.07	-0.19±1.41	2.48±6.15	-0.02±1.42	1.74±5.29	0.11±3.10	2.36±5.70	-0.70±2.05	1.54±5.29	-0.65±1.63	3.15±5.08	-1.09±1.56
9	3.16±7.09	0.02±1.43	2.74±6.50	0.36±1.47	3.21±4.22	-0.07±2.46	2.58±7.08	-0.21±2.69	3.16±8.86	-0.35±1.50	5.27±6.72	-1.22±1.80
10	2.24±7.74	0.46±1.37	1.57±4.24	0.72±1.77	1.55±4.67	0.32±1.46	2.74±6.04	0.22±1.34	1.41±8.90	-0.33±1.98	4.34±7.48	-1.08±2.04
11	1.17±3.66	-0.37±1.43	0.65±5.10	0.40±1.38	1.67±3.65	-0.36±1.98	2.59±3.85	0.37±1.93	0.61±7.59	-0.61±1.60	0.99±7.11	-0.29±1.29
12	0.73±4.19	-0.62±1.83	-0.82±4.30	-0.27±1.98	0.25±4.51	-0.64±1.69	1.21±3.19	-0.46±1.78	-0.08±6.56	-0.31±1.35	0.30±5.71	-0.93±1.85
13	-0.54±6.95	-0.49±1.58	0.45±4.72	-0.17±2.19	0.99±3.17	-0.30±0.94	-0.11±5.40	-0.46±1.40	0.28±5.40	-0.20±1.77	-1.36±6.94	-0.70±1.68
14	-0.29±5.95	-0.17±1.75	1.87±5.00	-0.06±1.08	3.02±4.43	-0.35±1.84	3.17±5.15	-0.58±1.81	0.59±4.07	0.56±1.61	0.25±5.50	0.05±1.59

Table 3.4

Mean hemodynamic response (μM) variations observed at each of the 14 pairs of both hemispheres during the four conditions of the Modified Stroop Task in older adults

Pairs	Denomination				Older Adults Interference				Switching			
	Right Hem.		Left Hem.		Right Hem.		Left Hem.		Right Hem.		Left Hem.	
	HbO	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR
1	0.72±3.20	-0.25±1.24	-0.41±1.19	-0.67±1.32	-0.25±1.42	-0.16±1.99	-0.67±1.32	-0.15±1.26	-0.16±1.98	0.01±1.03	-0.15±1.26	-0.81±1.68
2	10.99±7.84	0.43±1.62	-0.89±1.16	-0.76±1.69	0.43±1.62	0.31±1.91	-0.76±1.69	0.06±1.21	0.31±1.91	-0.35±1.70	0.06±1.21	-0.42±1.15
3	-8.17±5.87	0.25±1.31	-0.06±0.86	-0.29±1.26	0.25±1.31	0.32±1.53	-0.29±1.26	0.67±0.96	0.32±1.53	0.50±1.79	0.67±0.96	-0.48±1.53
4	-0.60±0.93	-0.38±1.01	-0.25±0.78	-0.19±1.73	-0.38±1.01	-0.81±1.28	-0.19±1.73	-0.09±1.75	-0.81±1.28	-1.03±1.88	-0.09±1.75	-0.34±1.13
5	-0.71±0.96	-0.30±0.99	-0.45±1.26	-0.15±1.44	-0.30±0.99	-0.58±1.40	-0.15±1.44	-0.15±1.36	-0.58±1.40	-0.79±1.36	-0.15±1.51	-0.60±1.08
6	-0.41±0.79	-0.34±0.98	-0.49±0.97	-0.20±1.01	-0.34±0.98	-0.50±1.05	-0.20±1.01	-0.50±1.19	-0.50±1.05	-0.82±0.90	-0.50±1.19	-1.15±1.63
7	-0.45±0.89	-0.21±1.61	-0.62±1.15	-0.26±1.16	-0.20±1.61	-0.42±1.49	-0.26±1.16	-0.81±1.51	-0.42±1.49	-0.64±1.32	-0.82±1.51	-1.01±1.10
8	-0.52±1.17	0.01±1.23	-0.61±1.72	-0.37±1.45	0.01±1.23	-0.33±1.41	-0.37±1.45	-0.45±1.65	-0.33±1.41	-0.42±1.43	-0.45±1.65	-1.29±1.83
9	-0.58±1.25	-0.18±1.18	-0.29±1.30	-0.58±1.97	-0.18±1.18	-0.49±1.16	-0.58±1.97	-0.49±1.36	-0.49±1.16	-0.36±1.87	-0.49±1.36	-1.09±1.74
10	-0.25±1.01	-0.08±1.13	-0.30±0.96	-0.48±1.73	-0.08±1.13	-0.50±1.11	-0.48±1.73	-0.28±1.78	-0.50±1.11	-0.19±1.71	-0.28±1.78	-0.30±1.08
11	-0.73±1.23	-0.94±1.74	0.04±1.84	-0.27±2.67	-0.94±1.74	-0.90±1.67	-0.27±2.67	-0.91±2.21	-0.90±1.67	-0.79±1.32	-0.91±2.21	-0.65±1.71
12	-0.44±1.26	-0.11±1.08	-0.06±1.56	0.15±1.64	-0.11±1.08	0.02±1.51	0.15±1.64	-0.45±1.65	0.02±1.51	-0.82±1.68	-0.45±1.65	-0.75±1.62
13	-0.54±0.98	-0.01±1.12	-0.03±1.02	-0.05±1.32	-0.01±1.12	-0.62±1.23	-0.05±1.32	-0.61±1.42	-0.62±1.23	-0.80±1.53	-0.61±1.42	-1.33±1.70
14	-0.41±1.36	-0.49±1.52	-0.40±1.32	-0.08±0.72	-0.49±1.52	0.16±1.06	-0.08±0.72	-0.73±1.86	0.16±1.06	-0.79±1.82	-0.73±1.86	-0.71±1.54

3.9 Figures

Figure Captions

Figure 3.1 Representation of significant results for younger adults in the optode array for HbO and HbR in the denomination, interference and switching conditions. The sources are represented by the blue circles and the detectors are represented by the orange squares. The anterior and posterior designations have been added to the DLPFC and the VLPFC by adding “a” and “p” respectively. Pair numbers are next to the light blue lines. Connectors above the X axis represent significant contrasts for HbO, while connectors below the X axis represent the significant contrasts for HbR.

Figure 3.2 Representation of significant results for older adults in the optode array for HbO and HbR in the denomination, interference and switching conditions. The sources are represented by the blue circles and the detectors are represented by the orange squares. The anterior and posterior designations have been added to the DLPFC and the VLPFC by adding “a” and “p” respectively. Pair numbers are next to the light blue lines. Connectors above the X axis represent significant contrasts for HbO, while connectors below the X axis represent the significant contrasts for HbR.

Figure 3.1

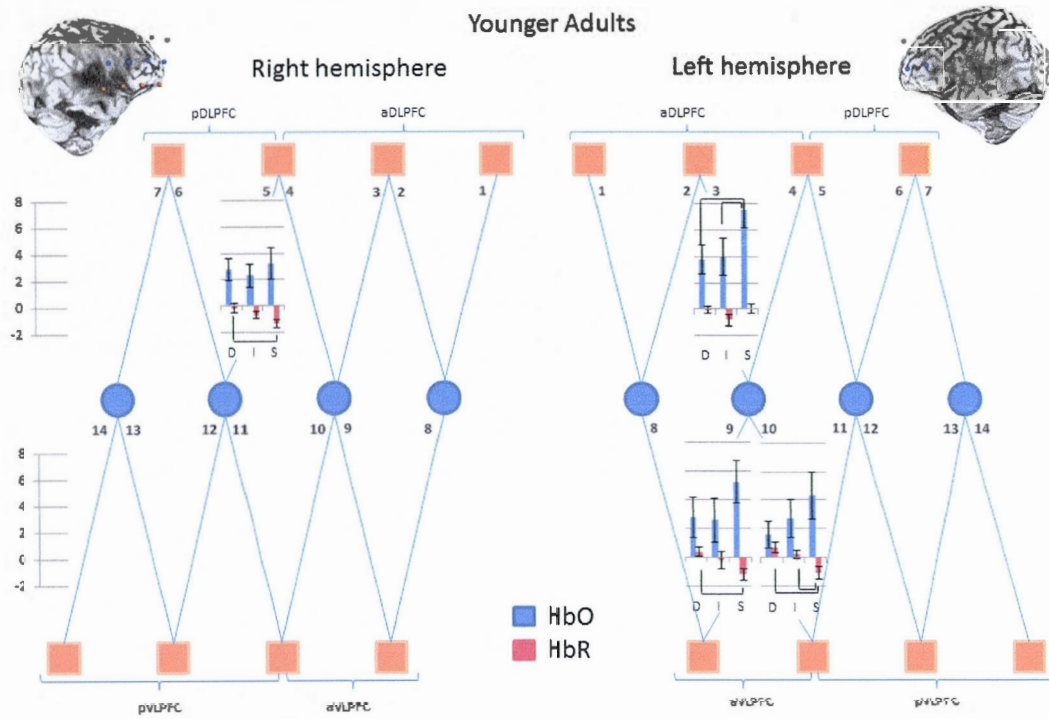
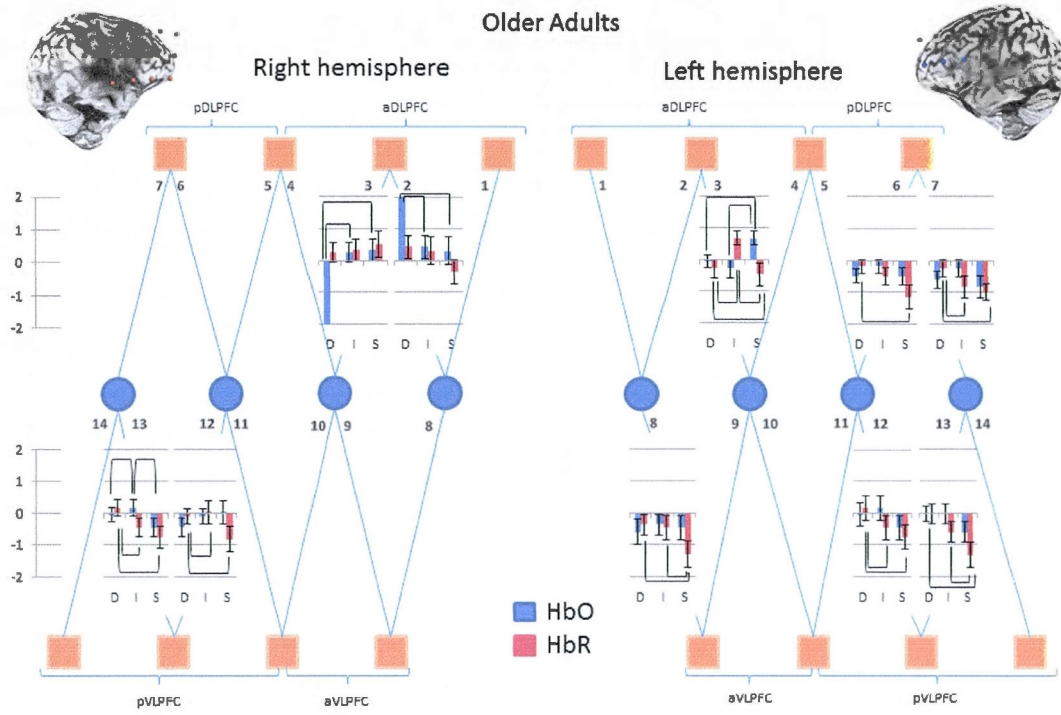


Figure 3.2



3.10 References

- Andrés, P., Guerrini, C., Phillips, L.H., Perfect, T.J., 2008. Differential effects of aging on executive and automatic inhibition. *Dev. Neuropsychol.* 33, 101–123.
- Aron, A.R., 2008. Progress in executive-function research: from tasks to functions to regions to networks. *Curr. Dir. Psychol. Sci.* 17, 124–129.
- Aron, A.R., Robins, T.W., Poldrack, R.A., 2004. Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends Cogn. Sci.* 8, 170–177.
- Bherer, L., Kramer, A.F., Peterson, M.S., 2008. Transfer effects in task-set cost and dual-task cost after dual-task training in older and younger adults: further evidence for cognitive plasticity in attentional control in late adulthood. *Exp. Aging Res.* 34, 188–219.
- Bohnen, N., Jolles, J., Twijnstra, A., 1992. Modification of the Stroop color word test improves differentiation between patients with mild head injury and matched controls. *Clin. Neuropsychol.* 6, 178–184.
- Brass, M., von Cramon, D.Y., 2002. The role of the frontal cortex in task preparation. *Cereb. Cortex* 12, 908–914.
- Braver, T.S., West, R., 2008. Working memory, executive control, and aging. In: Craik, F.I.M., Salthouse, T.A. (Eds.), *The Handbook of Aging and Cognition*, 3rd ed. Psychology Press, Taylor and Francis Group, New York (NY), pp. 311–372.
- Braver, T.S., Reynolds, J.R., Donaldson, D.I., 2003. Neural mechanisms of transient and sustained cognitive control during task switching. *Neuron* 39, 713–726.
- Bugg, J.M., DeLosh, E.L., Davalos, D.B., Davis, H.P., 2007. Age differences in Stroop interference: contributions of general slowing and task-switching specific deficits. *Aging Neuropsychol. C* 14, 155–167.
- Cabeza, R., Anderson, N.D., Locantore, J.K., McIntosh, A.R., 2002. Aging gracefully: compensatory brain activity in high-performing older adults. *Neuroimage* 17, 1394–1402.
- Cohen-Adad, J., Chapuisat, S., Doyon, J., Rossignol, S., Lina, J.M., Benali, H., Lesage, F., 2007. Activation detection in diffuse optical imaging by means of general linear model. *Med. Image Anal.* 11, 616–629.
- Cope, M., Delpy, D.T., Reynolds, E.O.R., Wary, I., Wyatt, I., van der Zee, P., 1988. Methods of quantitating cerebral near infrared spectroscopy data. *Adv. Exp. Med. Biol.* 222, 183–189.

- Davidson, D.J., Zacks, R.T., Williams, C.C., 2003. Stroop interference, practice, and aging. *Aging Neuropsychol C.* 85–98.
- Delpy, D.T., Cope, M., 1997. Quantification in tissue near-infrared spectroscopy. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 352, 649–659.
- Dennis, N.A., Cabeza, R., 2008. Neuroimaging of healthy cognitive aging, In: Craik, F.I.M., Salthouse, T.A. (Eds.), *The Handbook of Aging and Cognition*, 3rd ed. Psychology Press, Taylor and Francis Group, New York (NY), pp. 1–54.
- Derrfuss, J., Brass, M., Neumann, J., von Cramon, D.Y., 2005. Involvement of the inferior frontal junction in cognitive control: meta-analysis of switching and Stroop studies. *Hum. Brain Mapp.* 25, 22–34.
- DiGirolamo, G.J., Kramer, A.F., Barad, V., Cepeda, N.J., Weissman, D.H., Milham, M.P., Wszalek, T.M., Cohen, N.J., Banich, M.T., Webb, A., et al., 2001. General and task specific frontal lobe recruitment in older adults during executive processes: a fMRI investigation of task-switching. *Neuroreport* 12, 2065–2071.
- Dove, A., Pollman, S., Schubert, T., Wiggins, C.J., von Cramon, D.Y., 2000. Prefrontal cortex activation in task switching: an event-related fMRI study. *Brain Res. Cogn. Brain Res.* 9, 103–109.
- Dreher, J.C., Grafman, J., 2003. Dissociating the roles of the rostral anterior cingulate and the lateral prefrontal cortices in performing two tasks simultaneously or successively. *Cereb. Cortex* 13, 329–339.
- Dreher, J.C., Koechlin, E., Ali, S.O., Grafman, J., 2002. The roles of timing and task order during task switching. *Neuroimage* 17, 95–109.
- Duncan, A., Meek, J.H., Clemence, M., Elwell, C.E., Fallon, P., Tyszczuk, L., Cope, M., Delpy, D.T., 1996. Measurement of cranial optical path length as a function of age using phase resolved near infrared spectroscopy. *Pediatr. Res.* 39, 889–894.
- Ekkekakis, P., 2009. Illuminating the black box: investigating prefrontal cortical hemodynamics during exercise with near-infrared spectroscopy. *J. Sport Exerc. Psychol.* 31, 505–553.
- Ehlis, A.C., Herrmann, M.J., Wagnen, A., Fallgatter, A.J., 2005. Multi-channel nearinfrared spectroscopy detects specific inferior-frontal activation during incongruent Stroop trials. *Biol. Psychol.* 69, 315–331.
- Folstein, M.F., Folstein, S.E., McHugh, P.R., 1975. “Mini-mental state”. A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *J. Psychiatr. Res.* 12, 189–198.

- Gold, B.T., Powell, D.K., Xuan, L., Jicha, G.A., Smith, C.D., 2010. Age-related slowing of task switching is associated with decreased integrity of frontoparietal white matter. *Neurobiol. Aging* 31, 512–522.
- Grady, C., 2012. The cognitive neuroscience of ageing. *Nat. Rev. Neurosci.* 13, 491–505.
- Gratton, G., Wee, E., Rykhlevskaia, E.I., Leaver, E.E., Fabiani, M., 2009. Does white matter matter? Spatio-temporal dynamics of task switching in aging. *J. Cogn. Neurosci.* 21, 1380–1395.
- Gruber, S.A., Rogowska, J., Holcomb, P., Soraci, S., Yurgelun-Todd, D., 2002. Stroop performance in normal control subjects: an fMRI study. *Neuroimage* 16, 349–360.
- Hakun, J.G., Ravizza, S.M., 2012. Cognitive control: preparation of task switching components. *Brain Res.* 27, 53–64.
- Hampshire, A., Owen, A.M., 2006. Fractionating attentional control using event-related fMRI. *Cereb. Cortex* 16, 1679–1689.
- Hedden, T., Gabrieli, J.D.E., 2004. Insights into the ageing mind: a view from cognitive neuroscience. *Nat. Rev. Neurosci.* 5, 87–97.
- Hoshi, Y., 2003. Functional near-infrared optical imaging: utility and limitations in human brain mapping. *Psychophysiology* 40, 511–520.
- Huppert, T.J., Hoge, R.D., Diamond, S.G., Franceschini, M.A., Boas, D.A., 2006. A temporal comparison of BOLD, ASL, and NIRS hemodynamic responses to motor stimuli in adult humans. *Neuroimage* 29, 368–382.
- Jonides, J., Marshuetz, C., Smith, E.E., Reuter-Lorenz, P., Koeppe, R.A., Hartley, A.A., 2000. Age differences in behavior and PET activation reveal differences in interference resolution in verbal working memory. *J. Cogn. Neurosci.* 12, 188–196.
- Kimberg, D.Y., Aguirre, G.K., D'Esposito, M., 2000. Modulation of task-related neural activity in task switching: an fMRI study. *Brain Res. Cogn. Brain Res.* 10, 189–196.
- Kramer, A.F., Madden, D., 2008. Attention, In: Craik, F.I.M., Salthouse, T.A. (Eds.), *The Handbook of Aging and Cognition*, 3rd ed. Psychology Press, Taylor and Francis Group, New York (NY), pp. 189–250.
- Langenecker, S.A., Nielson, K.A., Rao, S.M., 2004. fMRI of healthy older adults during Stroop interference. *Neuroimage* 21, 192–200.
- Leenders, K.L., Perani, D., Lammertsma, A.A., Heather, H.D., Buckingham, P., Jones, T., Healy, M.J.R., Gibbs, J.M., Wise, R.J.S., Hatazawa, J., Herold, S., Beaney, R.P.,

- Brooks, D.J., Spinks, T., Rhodes, C., Frackowiak, R.S.J., 1990. Cerebral blood flow, blood volume and oxygen utilization. *Brain* 113, 27–47.
- León-Carriona, J., Damas-López, J., Martín-Rodríguez, J.F., Domínguez-Roldán, J.M., Murillo-Cabezasc, F., Barroso y Martina, J.M., Domínguez-Morale, J.M., 2008. The hemodynamics of cognitive control: the level of concentration of oxygenated hemoglobin in the superior prefrontal cortex varies as a function of performance in a modified Stroop task. *Behav. Brain Res.* 193, 248–256.
- Leung, H.C., Skudlarski, P., Gatenby, J.C., Peterson, B.S., Gore, J.C., 2000. An event-related functional MRI study of the Stroop color word interference task. *Cereb. Cortex* 10, 552–560.
- Lezak, M.D., Howieson, D.B., Loring, D.W., 2004. *Neuropsychological Assessment*, 4th ed. Oxford University Press, New York (NY).
- Logan, J.M., Sanders, A.L., Snyder, A.Z., Morris, J.C., Buckner, R.L., 2002. Under-recruitment and nonselective recruitment: dissociable neural mechanisms associated with aging. *Neuron* 33, 1–20.
- Logothetis, N.K., Wandell, B.A., 2004. Interpreting the bold signal. *Annu. Rev. Physiol.* 66, 735–769.
- MacDonald III, A.W., Cohen, J.D., Stenger, V.A., Carter, C.S., 2000. Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science* 288, 1835–1838.
- Mecklinger, A., von Cramon, D., Springer, A., Matthes-von, Cramon G., 1999. Executive control functions in task switching: evidence from brain injured patients. *J. Clin. Exp. Neuropsychol.* 21, 606–619.
- Milham, M.P., Erickson, K.I., Banich, M.T., Kramer, A.F., Webb, A., Wszalek, T., Cohen, N.J., 2002. Attentional control in the aging brain: insights from an fMRI study of the Stroop task. *Brain Cogn.* 49, 277–296.
- Mitchell, R.L.C., 2010. Linear increases in BOLD response associated with increasing proportion of incongruent trials across time in a color Stroop task. *Exp. Brain Res.* 203, 193–204.
- Miyake, A., Friedman, N.P., Emerson, M.J., Witzki, A.H., Howerter, A., Wager, T.D., 2000. The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks: a latent variable analysis. *Cogn. Psychol.* 41, 49–100.
- Monsell, S., 2003. Task switching. *Trends Cogn. Sci.* 7, 134–140.

- Obrig, H., Villringer, A., 2003. Beyond the visible: imaging the human brain with light. *J. Cereb. Blood Flow Metab.* 23, 1–18.
- Okamoto, M., Dan, H., Sakamoto, K., Takeo, K., Shimizu, K., Kohno, S., Oda, I., Isobe, S., Suzuki, T., Kohyama, K., Dan, I., 2004. Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10–20 system oriented for transcranial functional brain mapping. *Neuroimage* 20, 99–111.
- Park, D.C., Reuter-Lorenz, P., 2009. The adaptative brain: aging and neurocognitive scaffolding. *Annu. Rev. Psychol.* 60, 173–196.
- Prakash, R.S., Erickson, K.I., Colcombe, S.J., Kim, J.S., Voss, M.W., Kramer, A.F., 2009. Age related differences in the involvement of the prefrontal cortex in attentional control. *Brain Cogn.* 71, 328–335.
- Raz, N., 2000. Aging of the brain and its impact on cognitive performance: integration of structural and functional findings, In: Craik, F.I.M., Salthouse, T.A. (Eds.), *The Handbook of Aging and Cognition*, 2nd ed. Lawrence Erlbaum Associates, Mahweh (NJ), pp. 1–90.
- Raz, N., Ghisletta, P., Rodrigue, K.M., Kennedy, K.M., Lindenberger, U., 2010. Trajectories of brain aging in middle-aged and older adults: regional and individual differences. *Neuroimage* 51, 501–511.
- Reitan, R.M., Wolfson, D., 1985. *The Halstead–Reitan neuropsychological test battery: theory and clinical interpretation.* Neuropsychology Press, Tucson (AZ).
- Reuter-Lorenz, P., 2002. New visions of the aging mind and brain. *Trends Cogn. Sci.* 6, 394–400.
- Reuter-Lorenz, P.A., Cappell, K.A., 2008. Neurocognitive aging and the compensation hypothesis. *Curr. Dir. Psychol. Sci.* 17, 177–182.
- Reuter-Lorenz, P.A., Park, D.C., 2010. Human neuroscience and the aging mind: a new look at old problems. *J. Gerontol. B Psychol. Sci. Soc. Sci.* 65B, 405–415.
- Rogers, R.D., Monsell, S., 1995. Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *J. Exp. Psychol. Gen.* 124, 207–231.
- Rogers, R.D., Sahakian, B.J., Hodges, J.R., Polkey, C.E., Kennard, C., Robbins, T.W., 1998. Dissociating executive mechanisms of task control following frontal lobe damage and Parkinson's disease. *Brain* 121, 815–842.
- Rushworth, M.F.S., Hadland, K.A., Paus, T., Sipila, P.K., 2002. Role of the human medial frontal cortex in task switching: a combined fMRI and TMS study. *J. Neurophysiol.* 87, 2577–2592.

- Salthouse, T.A., Hambrick, D.Z., McGuthry, K.E., 1998. Shared age-related influences on cognitive and non-cognitive variables. *Psychol. Aging* 13, 486–500.
- Schroeter, M.L., Zysset, S., Kupka, T., Kruggel, F., von Cramon, D.Y., 2002. Near-infrared spectroscopy can detect brain activity during a color–word matching Stroop task in an event-related design. *Hum. Brain Mapp.* 17, 61–71.
- Schroeter, M.L., Zysset, S., Kruggel, F., von Cramon, D.Y., 2003. Age dependency of the hemodynamic response as measured by functional near-infrared spectroscopy. *Neuroimage* 19, 555–564.
- Smith, E.E., Geva, A., Jonides, J., Miller, A., Reuter-Lorenz, P., Koeppel, R.A., 2001. The neural basis of task-switching in working memory: effects of performance and aging. *PNAS* 98, 2095–2100.
- Sohn, M.H., Ursu, S., Anderson, J.R., Stenger, V.A., Carter, C.S., 2000. The role of prefrontal cortex and posterior parietal cortex in task switching. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 97, 13448–13453.
- Spring, O., Benton, A.L., 1997. *Neurosensory Centre for Comprehensive Examination of Aphasia (NCCEA)*, Revised Ed. Neuropsychological Laboratory, University of Victoria, Victoria (BC).
- Strangman, G., Franceschini, M.A., Boas, D.A., 2003. Factors affecting the accuracy of near-infrared spectroscopy concentration calculations for focal changes in oxygenation parameters. *Neuroimage* 18, 865–879.
- Stroop, J.R., 1935. Studies of interference in serial verbal reactions. *J. Exp. Psychol.* 18, 643–661.
- Stuss, D.T., Alexander, M.P., 2000. Executive functions and the frontal lobe: a conceptual view. *Psychol. Res.* 63, 289–298.
- Turner, G.R., Spreng, R.N., 2012. Executive functions and neurocognitive aging: dissociable patterns of brain activity. *Neurobiol. Aging* 33, 826.e1–826.e13.
- Verhaeghen, P., 2011. Aging and executive control: reports of a demise greatly exaggerated. *Curr. Dir. Psychol. Sci.* 20, 174–180.
- Verhaeghen, P., Cerella, J., 2002. Aging, executive control, and attention: a review of meta-analyses. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 26, 849–857.
- Verhaeghen, P., De Meersman, L., 1998. Aging and the Stroop effect: a meta-analysis. *Psychol. Aging* 13, 120–126.

- Wasylyshyn, C., Verhaeghen, P., Sliwinski, M.J., 2011. Aging and task switching: a meta-analysis. *Psychol. Aging* 26, 15–20.
- Wechsler, D., 1981. Wechsler Adult Intelligence Scale — Revised Manual. The Psychological Corporation, New York (NY).
- Wylie, G.L., Javitt, D.C., Foxe, J.J., 2004. Don't think of a white bear: an fMRI investigation of the effects of sequential instructional sets on cortical activity in a task-switching paradigm. *Hum. Brain Mapp.* 21, 279–297.
- Yesavage, J.A., Brink, T.L., Rose, T.L., Lum, O., Huang, V., Adey, M., Leirer, V.O., 1983. Development and validation of a geriatric depression screening scale: a preliminary report. *J. Psychiatr. Res.* 17, 37–49.
- Yeung, N., Nystrom, L.E., Aronson, J.A., Cohen, J.D., 2006. Between-task competition and cognitive control in task-switching. *J. Neurosci.* 26, 1429–1438.
- Zysset, S., Schroeter, M.L., Neumann, J., von Cramon, Y.D., 2007. Stroop interference, hemodynamic response and aging: an event-related fMRI study. *Neurobiol. Aging* 28, 937–948.

CHAPITRE IV

ÉTUDE II

Référence : Laguë-Beauvais, M., Fraser, S. A., Desjardins-Crépeau, L., Castonguay, N., Desjardins, M., Lesage, F., & Bherer, L. (soumis). Shedding light on the effect of priority instructions during dual-task performance in younger and older adults: A fNIRS study. *Brain and Cognition*.

Shedding light on the effect of priority instructions during dual-task performance in younger and older adults: A fNIRS study.

Maude Laguë-Beauvais^{a,b}, Sarah A. Fraser^{a,b}, Laurence Desjardins-Crépeau^{a,b}, Nathalie Castonguay^{a,b}, Michèle Desjardins^{b,c}, Frédéric Lesage^c & Louis Bherer^{a,b}

^aUniversité du Québec à Montréal, Département de Psychologie, C.P. 8888, succursale Centre-ville, Montréal, Québec, Canada, H3C 3P8

^bCentre de Recherche de l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal, 4545 Chemin Queen Mary, Montréal, Québec, Canada, H3W 1W4

^cÉcole polytechnique de Montréal, 2900, boulevard Édouard-Montpetit, Montréal, Québec, Canada, H3T 1J4

4.1 Abstract

Age-related differences in the ability to perform two tasks simultaneously (or dual-task) have become a major concern in aging neurosciences and have often been assessed with two distinct paradigms; the Psychological Refractory Period (PRP) and the Dual-Task (DT) paradigms. PRP studies assess participants when they give Priority to one task over the other (complete A then B), whereas in DT studies participants give Equal priority to both tasks (complete A and B). The Equal condition could be viewed as adding an executive control component to the task since the participants must spontaneously monitor attention between tasks. In the current study, we assessed the effect of priority instructions (Priority vs. Equal) on the dual-task performance and brain activity of younger ($n = 16$) and older adults ($n = 19$) with functional near infra-red spectroscopy (fNIRS). While the Priority condition showed right-sided activation in the prefrontal cortex during DT execution in younger adults, it becomes bilateral, yet restrained to specific areas, in older adults who showed increased activation in DT vs. single task condition in the left dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) and the bilateral ventrolateral prefrontal cortex (VLPFC). In the Equal condition younger adults showed isolated left DLPFC and VLPFC activation in DT condition and older adults' results revealed widespread bilateral DLPFC activation in the DT condition. These results suggest that for both older and younger adults, priority effects are associated with distinct patterns of prefrontal activation and that age-related differences exist in these patterns such that prefrontal activation seems to be more spread out at different sites in older adults when they are instructed to give Equal priority to both tasks.

Keywords: Prefrontal Cortex, Executive Functions, Dual-Task, Aging, Neuroimaging, fNIRS

4.2 Highlights

- Instructions to give equal priority to both tasks or to prioritize one were given
- Younger and older adults' prefrontal cortex activity was compared with NIRS in a DT
- Priority effects were linked with distinct age-related patterns of activation
- Older adults show a more spread out activation when instructed to give Equal priority

Shedding light on the effect of priority instructions during dual-task performance in younger and older adults: A fNIRS study.

4.3 Introduction

Many everyday activities require the rapid execution of simultaneous tasks (e.g., driving and adjusting the radio). Years of research have established age differences in the ability to divide attention between two tasks and recent research has proposed that age-related declines in the frontal lobes and executive function abilities (i.e., planning, monitoring, updating) underlie this age difference in divided attention (Hartley, Jonides, & Sylvester, 2011; Kramer & Madden, 2008). However, recent studies suggest that not all executive control mechanisms are equally affected by age (Verhaeghen, 2011) and that the pattern of prefrontal engagement might depend on the mechanisms involved (Lague-Beauvais, Brunet, Gagnon, Lesage, & Bherer, 2013).

Two experimental paradigms that have been widely used in behavioural and neuroimaging studies to examine divided attention abilities are the psychological refractory period paradigm [PRP (Vince, 1948; Welford, 1952)] and the dual-task (DT) paradigm (Kahneman, 1973). In the PRP paradigm, participants are asked to prioritize one task over the other [perform task A first then task B (Pashler & Johnston, 1998)] whereas in the dual-task paradigm, participants are told to give equal priority to the tasks being presented (Bherer et al., 2005; Erickson et al., 2007). While it has been argued that priority instructions do not eliminate the interference between the two tasks (Ruthruff, Pashler, & Hazeltine, 2003), it is unknown how this difference in the two paradigms influences age differences in dual-task interference and associated brain activity. Certainly both paradigms require managing dual-task interference when the two tasks appear in rapid succession. However, it could be argued that the equal priority paradigm involves an additional executive component, as the participant must coordinate the execution of the two tasks without pre-set rules. The current optical imaging study was designed to assess behavioral and neural age differences in dual-task performances as a function of priority instructions. Based on recent evidence supporting different patterns of prefrontal activation for tasks requiring different executive mechanisms

[e.g., switching vs. inhibition (Lague-Beauvais et al., 2013; Turner & Spreng, 2012)] and that these mechanisms are not affected equally in normal aging, we hypothesized that when performing two tasks at the same time, different task priority instructions would lead to different patterns of prefrontal lobe activation and that this effect would differ among older and younger adults.

In the PRP paradigm, participants are instructed to prioritize the first task presented and the time interval between the tasks or the stimulus onset asynchrony (SOA) varies randomly. Delays in the secondary task response are interpreted as evidence of a PRP effect, suggesting that at some point in time only one task can be processed (Lien & Proctor, 2002; Pashler & Johnston, 1998). Functional magnetic resonance imaging (fMRI) studies using the PRP paradigm with two visual tasks have revealed that in comparison to long SOAs, short SOAs increase the activation in the right frontal gyrus (Brodmann area 44) in younger adults who make a larger effort to respond rapidly to the tasks (Jiang, 2004; Jiang, Saxe, & Kanwisher, 2004). More recently, Hartley et al. (2011) demonstrated that younger adults recruited ventral medial areas, the right lateral prefrontal cortex, the left sensorimotor cortex, the right temporal lobe, right cerebellum and the left superior parietal lobe in the short SOA trials compared to the long SOAs also using two visual tasks. Greater activity was also reported in the long SOA compared the short SOA in the left inferior and middle occipital cortex (BA 19), in the left middle and superior orbital cortex (BAs 10 and 47) and in the right supplementary motor area (BA 6). Using a PRP paradigm that combined a visual and an auditory task, other studies have reported bilateral activations in short compared to long SOAs in the left inferior frontal sulcus (BAs 10, 45 and 46), bilateral middle frontal gyrus (BAs 8, 9 and 46) and bilateral superior frontal sulcus (BA 6) (Schubert & Szameitat, 2003; Szameitat, Schubert, Muller, & Von Cramon, 2002). They also noted increased activation with increased task difficulty. With the same paradigm, Sigman and Dehaene (2008) found an fMRI delay in dorsolateral prefrontal and intraparietal cortices that exceeded the PRP delay at the shortest SOA. Taken together, these findings support the idea that performing two tasks almost simultaneously or in parallel requires more executive control than doing two tasks serially.

To our knowledge, only one study asked participants to respond simultaneously to two tasks with an SOA of 0 ms. When comparing task-switching trials to DT trials, Dreher and Grafman (2003) found that younger participants engaged a fronto-parietal network associated with attention and the anterior cingulate cortex. In the frontal cortex, DT trials activated the bilateral medial (BAs 8, 9 and 44) and superior frontal gyri (BAs 6) and the pre-sensorimotor area. It seems that PRP paradigms mostly activate the right hemisphere, while increased priority demands or simultaneous DT paradigms produce bilateral activation. When comparing the age-related brain activation associated with short versus long SOAs with PRP, Hartley et al. (2011) found that older adults activation patterns were not as extensive as younger adults in the basal ganglia, the left occipital cortex and the left orbitofrontal cortex, but that activations were greater in older than younger adults in the right anterior prefrontal cortex (BA 10), the middle occipital gyri on the left (BA 39) and the right (BA 19), as well as the right cuneus (BA 19).

In contrast, in a DT paradigm which required simultaneous completion of color and letter discrimination tasks without any task priority instructions, Erickson et al. (2007) observed that in comparison to younger adults, older adults had longer response times and greater percent signal change in the left and right ventrolateral (VLPFC) and dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC). When comparing PRP and DT paradigm outcomes, results suggest that for older adults, the neural networks involved are dependent on the paradigm and it is still unclear how task priority instructions influence age differences in dual-task interference.

In sum, findings from younger adults suggest that when performing two tasks simultaneously, task priority instructions can lead to divergent findings both at the behavioural and neural levels. Task prioritization tends to show unilateral right frontal activation while equal priority instruction (complete both tasks simultaneously) is associated with bilateral activation. Results with older adults are less conclusive and studies more scarce, but also suggest activation patterns are altered as a function of task priority with a more distributed activation pattern over frontal regions in older compared to younger adults.

These conclusions remain tentative at this time given that no study has directly assessed task priority effects within the same paradigm.

The current study was designed to assess the effect of task priority instructions on age differences in behavioral and neural dual-task interference. A modified version of Erickson et al. (2007)'s dual-task paradigm was presented to younger and older adults under two conditions (equal priority or prioritized task). Behavioral (accuracy and reaction times) and neural [optical imaging (fNIRS) data from the frontal lobes (VLPFC and DLPFC)] were collected. It was predicted that equal priority would increase executive control demands and therefore increase dual-task interference at the behavioral and neural levels in comparison to priority instruction and that this priority effect would be exacerbated by age.

4.4 Method

4.4.1 Participants

Sixteen younger adults (9 women and 7 men, 20-29 years old) and 19 older adults (13 women and 6 men, 55-70 years old) were recruited with institutional review board-approved procedures. All participants were healthy, had normal-to-corrected vision and were right-handed. None of the participants had a history of neurological or psychiatric disorder, color blindness, a surgery with general anesthesia in the past 6 months, involuntary tremors, epilepsy and drug or alcohol problems. Subjects were not under any psychotropic or beta-blocking medications. Older adults did not show any signs of dementia on the Mini-Mental State Examination (i.e., below cut-off of 26/30; Folstein, Robins, & Helzer, 1983) or severe depression on the Geriatric Depression Scale (i.e., above cut-off of 10/36; Yesavage, 1988). All participants completed two testing sessions. In session one, participants signed a written informed consent and completed a brief neuropsychological examination. The event-related Dual-Task task was performed during the second session, which was usually held within a week of the neuropsychological examination. A monetary compensation was also given at the end of the second session.

The neuropsychological assessment consisted of eight tests evaluating working memory, attention span, processing speed, inhibition, flexibility, lexical access and capacity of abstraction. Demographic variables and neuropsychological performances are reported in Table 4.1.

4.4.2. Behavioral task

The current dual-task paradigm was composed of a Color and Letter task. In the Color Task, participants were asked to identify the color of an X, either yellow or green. They used their left middle and index fingers using the "A" and "S" keys of a QWERTY keyboard. In the Letter Task, participants had to identify the letter "B" or "C" by typing in the letter "K" or "L" with their right index and middle fingers. The Color Task appeared above the central point of the screen, while the Letter Task appeared below. The event-related DT procedure included blocks of single pure (SP) trials, single-mixed (SM) trials and dual-mixed (DM) trials. First, participants completed ten practice trials for each task. SP blocks then consisted of 20 trials of either the Color Task or the Letter Task. The two dual-task blocks included both 40 SM and 40 DM trials and were preceded by 24 practice trials in order to make sure participants understood the priority or equal instructions. SM trials were defined as trials where only the Color or the Letter Task appeared on the screen, but that are part of a block where there were DM trials as well; hence, the term Single Mixed. In the DM trials, participants had to answer both tasks as they both appeared on the screen one above the other.

The experimental design was an ABBA design. Participants always started with and finished with single pure blocks. The specific design sequence is illustrated in Figure 4.1.

For the first dual-task block, half of the participants were asked to prioritize the Letter Task over the Color Task, i.e., to answer this task first (Priority Block). For the second dual-task block, they were asked to give the same priority to both tasks, by not always answering to the Color Task or the Letter Task first (Equal Block). The other participants completed the Equal Block first and the Priority Block second. For all blocks, a fixation cross appeared in the middle of the screen during 1000 ms, followed by the SP, SM or DM trial

during 2000 ms. In SP and SM trials, a star appeared in place of the absent Color or Letter Task. The screen was blank between each trial. Participants sat at a distance of 56 cm from the screen and a head rest was used to stabilize their position. Response times (RT) and accuracy measures were computed.

4.4.3. fNIRS acquisition and analyses

Infrared spectroscopy uses the fact that spectral absorption properties of HbO and HbR are distinct in the near-infrared region where tissues are more transparent. By using two wavelengths (690nm and 830nm), relative changes in each hemoglobin component can be inferred using a modified Beer-Lambert law. According to some, HbO might mirror cerebral activation, but it is also dependent on blood pressure variations and is closer to blood flow due to a strong weighting in the arterial component (Obrig & Villringer, 2003). HbR variations may reveal oxygenation and volume of venous blood rather than cerebral blood flow (Hoshi, 2003).

In all experimental blocks, an event-related design was used and the inter-trial interval varied randomly from 7 to 11 seconds, for a mean of 9 seconds. This delay was selected to ensure that the participants' hemodynamic responses were back to baseline before a new stimulus appeared. Trials with an incorrect answer or no answer were removed from the analysis.

Changes in concentration of oxyhemoglobin (HbO) and deoxyhemoglobin (HbR) were measured by a multichannel, continuous-wave spectrometer (CW6, TechEn Inc., Milford, MA), which uses a combination of 830 nm and 690 nm wavelength to measure HbO and HbR. Two head probes were arranged with one central, anterior-posterior row of four emitters per hemisphere. Sixteen detectors were placed strategically 2.8 cm away from the emitters, eight of them were dorsal to the emitters, while the other eight were ventral, so that each probe had four dorsal detectors and four ventral detectors. The two probes were placed symmetrically over the lateral prefrontal cortex and the most anterior and most ventral pair of source-detector of each probe (pair 8) was placed on Fp1/Fp2 using the 10/20 system (Okamoto et al., 2004). In analyses, the 14 source-detector pairs were combined into four

different regions of interests (ROI) consisting of pairs 1 to 4 for the anterior DLPFC (aDLPFC ; BAs 9, 10 and 46), 5 to 7 for the posterior DLPFC (pDLPFC; BAs 6 and 4), 8 to 10 for the anterior VLPFC (aVLPFC; BAs 10, 45 and 46) and 11 to 14 for the posterior VLPFC (pVLPFC; BAs 4, 6 and 44) for both hemispheres (see figures 4, 5, 6 and 7 for results). Parietal activation was not measured given the fact that no age-related differences were expected in this specific region. Variables of interest are relative changes in concentration of HbO and HbR compared to baseline, because continuous-wave technology does not allow quantifying absolute concentration of HbO and HbR (Delpy & Cope, 1997; Hoshi, 2003).

Analysis of diffuse optical imaging (DOI) data acquired during cognitive tasks has been mainly done using ensemble averages of blocked protocols in the literature. Event-related designs with short inter-stimulus intervals require an analysis with a general linear model (GLM), in order to separate the contributions from overlapping hemodynamic responses (Cohen-Adad et al., 2007). One of the key aspects of this method is the role played by the drift functions modeling physiological noise. Because of the event-related design of this experiment, this approach was used instead of traditional filtering and averaging analysis techniques.

The raw data were first demodulated and downsampled to 10 Hz, then no further filtering was done. The measured changes in photon fluence, reflecting changes in tissue attenuation of light, were converted to changes in chromophore concentration using the modified Beer-Lambert law (Cope et al., 1988). Furthermore a multiplicative factor of 50 was applied to the computed concentration changes to account for the inhomogeneity of absorption changes over the probed region [partial volume effect (Strangman, Franceschini, & Boas, 2003)].

The GLM was then used to estimate the functional response. For each distinct event, a stimulus vector was constructed and convolved with a canonical hemodynamic response function taken from SPM software, previously shown to be adequate for DOI (Huppert, Hoge, Diamond, Franceschini, & Boas, 2006). The drift components in the signal were

modeled using a set of discrete cosine transform (DCT) functions with a cut-off frequency of 0.05 Hz (Cohen-Adad et al., 2007). The residual noise was assumed to be Gaussian and a Bayesian estimation of the response was finally performed for each event and chromophore (HbO and HbR).

4.4.4. Statistical analyses

Behavioral and NIRS data were analysed using PAWS v. 18.0 statistical software for Windows. Statistical significance was sphericity assumed at the .05 alpha level. All included participants were within 3 standard deviations to the RTs and accuracy means. To verify whether the prioritization and equal prioritization of the tasks worked, accuracy and response times (RT) were analyzed with a $2 \times 2 \times 2 \times 2$ mixed design ANCOVA with Instructions (Priority vs. Equal), Tasks (Letter vs. Color) and Trial type (SM vs. DM) as within subject factors and Age (younger vs. older) as the between subject factor with presentation order of the instructions as a covariate for both the priority and equal priority mixed blocks. The ANCOVA controls for the order in which the blocks were presented to the participants by minimizing error variance (Tabachnick & Fidell, 2001). In order to assess any gender effects, the same analysis was also conducted with gender as a between-subjects factor. Results did not reveal any gender effects, thus gender was not included in the following statistical analyses. Once we confirmed that the instructions of Priority and Equal conditions were followed, we averaged the RT and accuracy measures of the Letter and Color tasks in order to match the NIRS data analysis. A mixed ANCOVA design was then used with Age group (2) as the between-subjects factor and Trial types (3; SP, SM and DM) as within-subject factors for both the priority and equal priority mixed blocks with presentation order of the instructions as a covariate.

In order to directly compare the Priority and Equal conditions, we computed task-set costs (SM trials minus SP trials) and dual-task costs (DM minus SM trials). We then used these costs in a mixed ANCOVA with Age group (2), Cost (2; task-set vs. dual-task cost) and Instructions (2, Priority vs. Equal) with presentation order as a covariate. Follow-up analyses were conducted with LSD corrected pairwise comparisons.

In the fNIRS data, for each participant that was above or below two standard deviations from their individual activation average were replaced by the mean of the age group for that specific variable. Only 6.48% of older adults' data and 7.42% of younger adults' data was replaced. Separate ANCOVAs were done comparing SM trials from the Priority block to SP trials, SM trials from the Equal block to SP trials, DM trials from the Priority block to SP trials, DM trials from the Equal block to SP trials, as well as DM trials to SM trials from the Priority block and DM to SM trials from the Equal block. Presentation order of the instructions served as a covariate. Follow-up analyses were conducted with LSD corrected pairwise comparisons. ANCOVAs were computed for each pair for HbO and HbR for younger and older adults separately, because as reported in Raz, Ghisletta, Rodrigue, Kennedy, and Lindenberger (2010), many changes occur in healthy aging, such as atrophy and thinning of the cortex. These age-related changes in the brain could alter the way that the NIRS light scatters and is absorbed in tissue, such as the skull, the brain density and skin, and can influence DPF (Duncan et al., 1996). As such, a more conservative approach is to examine the patterns of concentration changes in each age group separately.

For the pairs in which we had significant concentration changes (HbO and HbR) between the DM and SM trials in both the priority and equal conditions, we computed Pearson's bivariate correlations looking at the dual-task costs (DM – SM) for RT and accuracy and its association with concentration changes. In the case of HbO, a negative correlation between increased change in concentration and decreased accuracy dual-task costs would indicate that increased activation is associated with poorer dual-task performance. In the case of HbR and accuracy, a negative correlation would indicate that a larger change in concentration is associated with greater accuracy costs. For RT costs, a positive correlation in HbO and a negative correlation in HbR would confirm that a larger concentration change would be linked to a greater cost. Only significant results are reported.

4.5 Results

4.5.1. Behavioural Analysis

All results of the behavioral analyses are presented in Table 4.2 for both Response Times and Accuracy of the Priority and Equal conditions. See Figure 4.2 for raw scores in all conditions.

4.5.1.1. Confirming Instruction Compliance

By comparing the tasks in the Priority and Equal conditions, we were able to confirm the compliance with our instructions.

4.5.1.1.1. Response Times (RT)

In response times, we found a quadruple interaction of Instructions \times Trial Type \times Task \times Age Group, $F(1, 32) = 13.84$, $p = .001$, $\eta^2 = .30$, which for the purpose of this analysis, is the only one that we report. Pairwise comparisons showed that younger and older adults in the Priority condition, in both SM and DM trials were faster in the prioritized task (Letter) than in the non-prioritized one (Color; $ps < .001$), while in the Equal condition, both age groups were faster for the Letter task than for the Color task only in SM trials and not DM trials ($ps < .05$). Furthermore, we also found that the Letter task (prioritized task) was faster in the Priority condition than in the Equal condition in the DM trials in younger adults and in both SM and DM trials in older adults ($ps < .05$). In contrast, younger adults showed that they were faster for the Color task in the Equal condition than in the Priority condition in SM trials only ($p < .05$), while older adults were revealed to be faster in DM trials only ($p < .05$). In the Priority condition, only for the Color task were younger adults faster than older adults in both SM and DM trials ($ps < .05$). In the Equal Condition, younger adults were faster than older adults in both the Color and Letter task ($ps < .05$). Finally, no matter, the age group, tasks or instructions, SM trials were always faster than DM trials ($ps < .001$).

4.5.1.1.2. Accuracy

Accuracy analysis also revealed a quadruple interaction of Instructions \times Trial Type \times Task \times Age Group, $F(1, 32) = 4.38$, $p < .05$, $\eta^2 = .12$, which we decomposed with pairwise

comparisons. In older adults, the Letter task was more accurate in DM trials in the Priority condition than in the Equal condition ($p < .05$) and this task was more accurate in the SM trials than the DM trials in the Equal condition. In younger adults, the prioritized task (Letter) was more accurate than the Color task in the Priority condition for both SM and DM trials ($p < .05$).

4.5.1.2. Priority Condition

4.5.1.2.1. Response Times

As seen in figure 2, in the Priority condition, main effects showed that older adults were significantly slower than younger adults, $p < .03$, that the Color task was slower than the Letter task, $p < .001$, and that the SP trials were faster than the SM trials, which were both faster than DM trials, $p < .001$. Significant interactions (Age x Task) revealed that for the Color task, older adults were slower than younger adults, $p < .01$, and older adults were only slower than younger adults in the SP trials ($p < .01$) in the prioritized Letter task.

4.5.1.2.2. Accuracy

The ANCOVAS did not reveal any significant accuracy differences across levels.

4.5.1.3. Equal Condition

4.5.1.3.1. Response times

In the Equal Condition, main effects showed that older adults were generally slower than younger adults, $p < .01$, that the Color task was performed slower than the Letter task, $p < .001$, and that the SP trials were faster than the SM trials, which were both faster than DM trials, $p < .001$. Interactions (Trial Type x Task x Age) revealed that the Color task was performed slower than the Letter task ($p < .05$) for both SP and SM trials in younger and older adults. In the Letter task, older adults were slower than younger adults across all Trial Types, i.e., SP ($p < .01$), SM ($p < .05$), and DM ($p < .05$). Still, in the Color task, this was only true for SP ($p < .01$) and SM ($p < .001$).

4.5.1.3.2. Accuracy

Interactions revealed that in DM trials younger adults were more accurate than older adults, ($p < .05$). Additionally, in younger adults SP trials were significantly more accurate than SM trials ($p < .01$), while in older adults there was a significant difference across all Trial Types, such that SP trials were more accurate than SM trials ($p < .05$), and SP and SM were both more accurate than DM trials ($ps < .01$).

4.5.1.4. Cost Analysis

See Figure 4.3 for raw scores.

4.5.1.4.1. Response Times

An Instructions \times Cost interaction was found, $F(1, 32) = 37.13$, $p < .001$, $\eta^2 = .54$. Pairwise comparisons revealed that the dual-task cost was larger in the Equal condition than in the Priority condition, $p < .001$. Task-set cost did not differ among priority conditions but was generally larger than dual-task cost, $p < .001$.

4.5.1.4.2. Accuracy

A main effect of age was found, $F(1, 32) = 5.27$, $p < .05$, $\eta^2 = .14$, revealing that globally older adults had larger costs (task-set and dual-task costs) than younger adults. However, a Cost \times Age group interaction was also found, $F(1, 32) = 7.17$, $p < .05$, $\eta^2 = .18$. Pairwise comparisons demonstrated that the dual-task cost of older adults was larger than that of younger adults, $p < .01$. In younger adults, the task-set cost was greater than the dual-task cost, $p < .05$, while both costs were equivalent in older adults.

4.5.3.1.4.3. Speed-Accuracy Trade-off

Given the age differences in accuracy, the mean DM scores were evaluated for speed-accuracy trade-offs in each age group. Pearson bivariate correlations were conducted between speed ($1/RT$) and accuracy DM scores for each condition (Priority/Equal Priority). A negative correlation would be expected if participants were slowing to be more accurate or vice versa. One correlation was significant for older adults in the equal condition and the

correlation was positive ($r = .48$, $p < .05$) suggesting that those who responded faster were also more accurate.

4.5.2. fNIRS

4.5.2.1. Younger adults

4.5.2.1.1. Priority Condition

Figure 4.4 shows condition-related changes in activation (HbO and HbR) in the Priority condition for younger adults, while figure 5 represents changes in activation in the Equal condition. In the right hemisphere, HbO results revealed that the DM trials of the Priority block showed a greater positive concentration change than SP trials in pair 10 (aVLPFC), $F(1, 14) = 9.57$, $p < .01$, $\eta^2 = .41$, while the SM trials in the Priority block had a greater negative HbO concentration change than the DM trials of the same block in pair 12 (pVLPFC), $F(1, 14) = 5.88$, $p < .05$, $\eta^2 = .30$. In addition, SP trials had a greater positive concentration change than the DM trials in the Priority block in pair 12 (pVLPFC).

As for HbR, results in the right hemisphere showed that the SP trials have a greater negative concentration change than SM trials in the Priority block in pair 6 (pDLPFC), $F(1, 14) = 8.29$, $p < .05$, $\eta^2 = .37$, and pair 7 (pDLPFC), $F(1, 14) = 10.67$, $p < .01$, $\eta^2 = .43$. There was also a greater positive concentration change for SM trials than DM trials in the Priority block in pair 1 (aDLPFC), $F(1, 14) = 7.21$, $p < .05$, $\eta^2 = .34$.

4.5.2.1.2. Equal Condition

As showed in Figure 4.5, for HbO, in the left hemisphere, there was a trend for the SM trials to have a greater positive concentration change than the DM trials of the Equal block in pair 3 (aDLPFC), $F(1, 14) = 4.45$, $p = .05$, $\eta^2 = .24$.

As for HbR, results in the right hemisphere showed that the SP trials had a greater negative concentration change than SM trials, $F(1, 14) = 5.34$, $p < .05$, $\eta^2 = .28$, and DM trials, $F(1, 14) = 13.71$, $p < .01$, $\eta^2 = .50$ in the Equal block in pair 7. In the left hemisphere,

the analysis demonstrated that the SM trials had a greater negative concentration change than the DM trials in the Equal block in pair 11 (pVLPFC), $F(1, 14) = 5.03$, $p < .05$, $\eta^2 = .26$.

4.5.2.2. Older adults

4.5.2.2.1. Priority Condition

Condition-related changes in HbO and HbR observed in older adults are depicted in Figure 4.6 for the Priority condition and in Figure 4.7 for the Equal condition. In pair 9 (anterior VLPFC) in the right hemisphere, HbO results revealed that the DM trials in the Priority block had a lower negative concentration change than the SP trials, $F(1, 17) = 4.71$, $p < .05$, $\eta^2 = .22$, and SM trials, $F(1, 17) = 5.46$, $p < .05$, $\eta^2 = .24$. As for HbR, DM trials of the Priority block also showed greater negative concentration change than SP trials in pair 6 (pDLPFC) of the left hemisphere, $F(1, 17) = 7.94$, $p < .05$, $\eta^2 = .32$. Results showed that DM trials had a greater negative concentration in the left hemisphere change than SM trial both in the Priority block for pair 1 (aDLPFC), $F(1, 17) = 6.32$, $p < .05$, $\eta^2 = .27$, and pair 14 (pVLPFC), $F(1, 17) = 5.66$, $p < .05$, $\eta^2 = .25$. However, there was a trend for SM trials in the priority block showed a greater concentration change than DM trials in pair 13 (pDLPFC) of the right hemisphere, $F(1, 17) = 4.31$, $p = .05$, $\eta^2 = .20$.

3.2.2.2. Equal Condition

In HbR data, the SP trials had a greater negative concentration change than SM in the Equal priority block (see Figure 7) in the left hemisphere in pair 2 (aDLPFC), $F(1, 17) = 4.33$, $p = .05$, $\eta^2 = .20$, pair 6 (pDLPFC), $F(1, 17) = 4.65$, $p < .05$, $\eta^2 = .22$, and pair 12 (pVLPFC), $F(1, 17) = 5.52$, $p < .05$, $\eta^2 = .25$, as well as in the right hemisphere for pair 2 (aDPFC), $F(1, 17) = 4.66$, $p < .05$, $\eta^2 = .22$, pair 4 (aDLPFC), $F(1, 17) = 6.39$, $p < .05$, $\eta^2 = .27$, and pair 10 (aVLPFC), $F(1, 17) = 4.43$, $p = .05$, $\eta^2 = .21$. In two instances, the SM trials showed a larger negative concentration change than the SP trials in pair 8 (aVLPFC), $F(1, 17) = 5.18$, $p < .05$, $\eta^2 = .23$ and pair 12 (pVLPFC) of the right hemisphere, $F(1, 17) = 6.75$, $p < .05$, $\eta^2 = .28$. In addition, DM trials in the Equal block revealed greater negative concentration change than SP trials for pair 2 (aDLPFC), $F(1, 17) = 4.92$, $p < .05$, $\eta^2 = .22$ and pair 5 (pDLPFC), $F(1, 17) = 5.92$, $p < .05$, $\eta^2 = .26$, in the left hemisphere. Finally, DM trials also revealed greater negative concentration changes than SM trials in the left hemisphere for pair 2 (aDLPFC), $F(1, 17) = 6.17$, $p < .05$, $\eta^2 = .27$, pair 4 (aDLPFC), $F(1,$

17) = 4.48, $p < .05$, $\eta^2 = .21$, pair 5 (pDLPFC), $F(1, 17) = 4.76$, $p < .05$, $\eta^2 = .22$, pair 6 (pDLPFC), $F(1, 17) = 4.89$, $p < .05$, $\eta^2 = .22$ and pair 7 (pDLPFC), $F(1, 17) = 6.75$, $p < .05$, $\eta^2 = .28$, as well as in the right hemisphere for pair 2 (aDLPFC), $F(1, 17) = 10.89$, $p < .01$, $\eta^2 = .39$, $F(1, 17) = 4.65$, $p < .05$, $\eta^2 = .22$, pair 4 (aDLPFC), $F(1, 17) = 8.81$, $p < .01$, $\eta^2 = .34$, and pair 5 (pDLPFC), $F(1, 17) = 7.01$, $p < .05$, $\eta^2 = .29$.

4.5.3. Correlations between Behavioral Performance and Concentration Changes

4.5.3.1. Younger Adults

No significant correlations between RTs and fNIRS data were found in younger adults. However, results revealed that in the Equal priority condition in the left aDLPFC (pair 3) for HbO, a greater cost in accuracy was linked to a higher concentration change in HbO ($r = -.62$, $p < .05$). However, in the Priority condition in the right anterior prefrontal cortex (pair 1) for HbR, a greater cost in accuracy was linked to a smaller concentration change in HbR ($r = -.65$, $p < .01$).

4.5.3.2. Older Adults

Correlations in older adults only showed significant results in the Equal condition in HbR. For RTs, the concentration change was greater (more negative) when the RT cost was larger mostly in the left pDLPFC with pair 4 ($r = -.52$), pair 5 ($r = -.52$) and pair 7 ($r = -.54$) showing significant effects ($ps < .05$) as well as in the right pDLPFC in pair 5 ($r = -.50$, $p < .05$). For accuracy, the concentration change was also greater (more negative) when the accuracy cost was larger (also more negative) mostly in the left pDLPFC as well with pair 4 ($r = -.45$), pair 5 ($r = -.47$) and pair 6 ($r = -.64$), showing significant correlations ($ps < .05$).

4.6 Discussion

The present study evaluated the influence of different task priority instructions on age-related differences in behavior and functional brain activation patterns in the prefrontal cortex (PFC) during dual-task performance. Younger and older adults completed a dual-task paradigm which included SP, SM and DM trials while changes in their PFC activity were acquired with fNIRS. Our results suggest that the way tasks are prioritized is associated with different functional activation patterns in the prefrontal cortex subregions, indicative of

separate contributions from specific executive mechanisms when managing multiple tasks. In addition, overall the younger and older adults in this study produced different HbO and HbR activation patterns and these patterns were influenced by task priority instructions. The lack of behavioural differences in younger and older adults in the priority condition and the minimal contribution of the PFC suggest that instructing priority reduces dual-task costs, while increased behavioural costs in equal priority and the widespread HbR variations in older adults suggests that this condition increases executive demands of dual-task performance for older adults.

4.6.1. Behavioural Findings

As a first step, our findings confirm that our participants did follow instructions, since younger and older adults were faster and more accurate in the letter task when this task was prioritized (Priority condition) than when it was not (Equal condition). However, consistent with existing literature (Erickson et al., 2007; Hartley et al., 2011), no matter what priority instructions were given, the current findings suggest that older adults are generally slower than younger adults across trial types (SP, SM or DM). In line with Erickson et al.'s (2007) DT findings, in both conditions, younger and older adults had faster SP trials than SM trials which were both faster than DM trials.

The influence of Priority instructions emerged when examining the accuracy data. No significant differences were found across trial type or age in the Priority condition, while significant age-differences emerged in DM trials of the Equal condition. The differences indicate that the DM Equal condition increased the cognitive difficulty of the dual-task situation for older adults only. In line with RT results, the Equal condition influenced all trial types for the older adults, i.e., SP trials were more accurate than SM trials and they were both more accurate than DM trials; whereas for younger adults, the Equal condition only produced differences in accuracy between the SP and SM trials (SP > SM). In other dual-task research that has not compared task priority instructions, there are usually no main effects of age in accuracy results for DT (Erickson et al., 2007), nor PRP paradigms (Hartley, 2001; Hartley et al., 2011). We are the first to provide evidence of a priority effect specific to the Equal condition in accuracy.

While in the Priority Condition younger and older adults showed equal performances in the prioritized task (Letter task) in SM and DM trials, older adults were always slower than younger adults in the second task (Color task). In contrast, in the Equal condition, younger and older adults had equal performance in all trial types (SP, SM and DM) in the Letter task, but older adults were slower than younger adults in SP and SM in the Color task. Hence, priority instructions facilitated older adults' RT performance in the prioritized task minimizing age differences in this task; this was at a cost to their performance on the secondary (non-prioritized) task which demonstrates age differences in RT across all trial types. In contrast, Equal Priority instructions resulted in equivalent RT performance across tasks with a decrease in accuracy performance in older compared to younger adults.

Cost analyses compared the Priority and Equal conditions directly by averaging both Letter and Color tasks together. The cost of the Equal condition was greater than the cost of the Priority condition across both the task-set cost and dual-task cost, which provides converging evidence to the proposal that Equal priority puts a toll on cognitive resources. Age differences only emerged in the accuracy costs for which older adults had greater dual-task costs than younger adults. Interestingly, younger adults show a task-set cost, while older adults show both task-set and dual-task costs, implying that managing two tasks at the same time taxes executive control in older adults.

4.6.2 Imaging Findings

In general, when examining the fNIRS results in terms of oxygenation changes (both HbO and HbR), Figures 4 to 7 illustrate that differences exist between younger and older adults when managing multiple task performance. In Equal Priority, younger adults show localized significant task effects whereas in older adults there is a widespread significant task effect. In contrast, in both younger and older adults there are very few pairs active for the Priority condition. Without examining the specific oxygenation measures that changed (HbO or HbR), the pattern suggests that the Equal Priority condition influences concentration changes in the PFC for older adults.

For the Priority condition, the fNIRS data revealed that in younger adults SP trials demonstrated greater concentration changes than the SM trials (pairs 6 and 7) in the right pDLPFC in HbR and even compared to DM trials in one pair in the right pVLPFC (pair 12) in HbO. However, DM trials were found to produce greater concentration changes generally in more frontal areas, that is the right aDLPFC (pair 1) in HbR and aVLPFC (pair 10) and one in the right pDLPFC (pair 12) in HbO. This right-sided activation corresponds to existing younger adult findings in the PRP literature (Hartley et al., 2011; Jiang, 2004; Jiang et al., 2004), although Schubert and Szameitat (2003); Szameitat et al. (2002) did find some bilateral activation this may have been due to the use of one auditory and one visual task, instead of two visual tasks as in the current study. In older adults, only DM trials produced significant concentration changes in the right VLPFC like younger adults (anterior – pair 9 in HbO and posterior – pair 13 in HbR) when compared to either SP or SM trials, but older adults also recruited largely in the left hemisphere in both the DLPFC (anterior – pair 1 and posterior – pair 6) and the pVLPFC (pair 13) in HbR.

As for the Equal condition, the younger adults repeated the pattern of SP trials having a greater concentration change in HbR than SM and DM trials in the right pDLPFC (pair 7), while SM trials had greater concentration changes in HbR in the pVLPFC (pair 11) as well in the left aDLPFC (pair 3). In contrast to what was found in Dreher and Grafman (2003), concentration changes in the DM trials were not significantly different from the changes in other trial types. This may be because the targeted brain areas we covered with the fNIRS cap were not broad enough or because the cerebral changes elicited in the DM trials were the same as the SP and SM trials and we could not detect subtle differences in the PFC.

Older adults also showed greater concentration change in HbR in SP trials compared to SM trials in the right aDLPFC (pair 2), in the left pDLPFC (pairs 6 and 7). In contrast, SM trials also showed greater concentration changes than SP trials in the right anterior (pair 8) and posterior (pair 12) VLPFC. Most importantly, DM trials in this specific condition engaged the bilateral DLPFC globally, showing differences mostly between DM and SM trials in the right (pairs 2, 4 and 5) and left DLPFC (pairs 2, 4, 5, 6 and 7), which corroborates results from Erickson et al. (2007). There are also differences between DM and SP trials in

the left DLPFC (pairs 2 and 5). Therefore, it would seem that the predicted increase in concentration change between the Priority and Equal conditions was found in older adults only, revealing a dichotomy between the two groups in dual-tasking management strategies.

One facet of the data remains difficult to comprehend. Although there are barely any statistical differences between the SP, SM and DM trials in HbO concentrations in older adults, these concentrations are found to be mostly negative and specifically in the SM trials no matter the priority condition. It would seem that although the HbR concentrations in older adults diminish as expected appropriately in a SM situation where the task-set cost is increased, the HbO counterpart does so as well. To our knowledge at least one other study reports frontal negative HbO concentrations during a cognitive task (Pfurtscheller, Ortner, Bauernfeind, Linortner, & Neuper, 2010). Testing only younger adults, the study revealed surrounding negative HbO values in a single mental arithmetic task accompanied with positive values in focal areas of the PFC cortex. They compared their results to the antagonistic activation patterns found in fMRI in a real and imagined foot motor task where there also was a negative BOLD signal in the surrounding area of the focal activation (Ehrsson, Geyer, & Naito, 2003). In a study done with rats (Devor et al., 2007), it was hypothesized that this decrease in blood oxygenation could be due to neuronal inhibition and parallel arteriolar vasoconstriction. We could speculate that older adults being put in a situation where multiple task responses are required and they have to decide how they will respond to both tasks may inhibit neuronal responses, instead of activating the potential possible regions necessary to complete the task.

4.6.3 Correlations between Brain and Behaviour

The correlations between the participants' behavioural dual-task costs and concentration changes from SM to DM trials (also dual-task cost) from the Priority and Equal conditions give us insight as to how the brain manages information depending on the instruction that was given. When linking behavioral performance and concentration changes, results are mixed; with certain studies reporting positive correlations (Herath, Klingberg, Young, Amunts, & Roland, 2001), others negative correlations (Jiang et al., 2004), or no significant correlations (Hartley et al., 2011). As for the current study, in the Priority

condition, younger adults' results showed that in the right aDLPFC (pair 1), a greater cost in accuracy was associated with a smaller concentration change in HbR. Older adults did not show any correlations between DT costs and fNIRS Priority condition data.

In the case of the Equal condition, results for younger adults reveal that in the left aDLPFC (pair 3); a greater cost in accuracy was linked to a greater concentration change in HbO. In addition, correlations between DT cost and fNIRS Equal conditions data showed results in both RT costs and accuracy costs in HbR in older adults. For RT costs, a greater concentration change was associated with a larger RT cost generally in the left pDLPFC (pair 4, 5 and 7) as well as in the right pDLPFC (pair 5). In accuracy, the concentration change was also greater when the accuracy cost was larger in the left pDLPFC (pairs 4, 5 and 6). Whereas Hartley et al. (2011) did not find any significant correlations between behaviour RT costs and brain activation in a PRP paradigm, those reported for older adults in the right lateral PFC and right polar PFC support our findings, which seems to suggest an added contribution of the left hemisphere when Equal priority instructions are given. Therefore, there is an interesting distinction between the two conditions in younger adults: they are more efficient with greater activation in the Priority condition and less efficient with a greater activation in the Equal condition. In older adults, results from the Equal Priority condition correspond to younger adult findings such that increased HbR concentrations are associated with poorer dual-task performance.

Although many neurophysiological hypotheses endeavour to explain the differences in brain activation between older and younger adults, none has been really satisfactory in explaining age-related changes in executive functioning and attention. In the present study older adults engaged more prefrontal regions when engaged in the Equal priority condition, as if an added executive component boosted the demands of the prefrontal cortex and more resources actually became available. This observation fits with the Scaffolding Theory of Aging and Cognition [STAC; (Park & Reuter-Lorenz, 2009)] which proposes that brain activity increases with age in the frontal cortex due to additional circuitry built as the brain reorganizes itself with age due to increased plaques, tangles and general shrinkage. The

dedifferentiation of the activation found in the Equal priority condition with the poorer behavioural performance in older adults gives weight to this last model.

4.6.4. Limitations of the current study

Limitations of the study include the limited depth penetration of light and diffusion, which restrains the spatial resolution (Boas, Dale, & Franceschini, 2004). Consequently, we could not observe any activation in the anterior cingulate cortex or deep cortical or subcortical structures, which are often reported in PRP studies. In addition, most PRP and DT studies report activation in the parietal cortex, but because of optode positioning, concentration changes in these locations were not measured in the present study. A choice was made to measure brain activation patterns in the frontal lobe only, since neural differences were mostly captured in that area between the two paradigms. However, lack of whole brain sampling remains a technical limitation in this experiment. One last limit remains in the fact that younger and older adults were not directly compared because of physiological and signal diffusion differences between the two populations.

4.6.5. Conclusions

These results indicate that giving the instruction to prioritize one task over the other will minimize the effect of managing two tasks at once, even if these tasks are presented simultaneously. Thus, participants demand more of their executive functions and attentional resources when having to give equal priority to both tasks, which means that PRP paradigms might not be the best measure of perfect attentional sharing, since participants are asked to always complete one task before the other. In everyday situations, individuals must manage two tasks presented to them without a set order of completion and therefore DT paradigms with Equal Priority are more representative of the type of divided attention situation one would have to manage in everyday life. In addition, older adults' brain patterns reveal two types of activation depending on whether they are asked to prioritize or give equal priority to both tasks, indicating an increase in activation with added executive functioning and a psychophysiological dedifferentiation in giving equal priority to both tasks when compared to younger adults. In order to maintain or improve divided attention abilities in the everyday lives of older adults, future research should look at the impact of a DT training paradigm with

equal priority and evaluate the possibility of compensation or brain plasticity in older adults when tasks are more demanding.

4.7 Acknowledgements

We thank Maxime Lussier, B.Sc., for his help programming the behavioural task and Patrick Roy for the final verifications of the fNIRS figures.

4.8 Funding

This work was supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (grant number 298918-2009), the Canadian Institutes of Health Research – Institute of Aging (fellowship number 200610SIA-170467-162735) and the Fonds de recherche du Québec - Nature et technologie (fellowship number 140239).

4.9 Tables

Table 4.1

Demographic variables and performances in neuropsychological tests for both younger and older adults.

Measure	Young (n=16)	Old (n=19)
Age	23.94 (2.32)	63.47 (3.67)*
Education	16.75 (1.69)	15.16 (3.02)
MMSE	N/A	28.26 (0.93)
GDS	N/A	2.79 (2.80)
<u>Working memory</u>		
Letter-Number Sequence (raw scores)	13.25 (2.08)	10.16 (2.12)*
<u>Attentional span</u>		
Digit Span (raw scores)	19.75 (2.86)	16.58 (3.64)*
<u>Speed processing</u>		
Symbol Search (raw scores)	45.63 (5.67)	27.47 (5.44)*
Digit Symbol Substitution Test (raw scores)	94.88 (12.65)	69.63 (13.16)*
<u>Abstraction</u>		
Matrix reasoning (raw scores)	21.80 (3.84)	15.79 (5.18)
Similarities (raw scores)	26.63 (2.96)	22.47 (5.44)*
<u>Attention and executive functions</u>		
Trail Making A (time in seconds)	24.81 (7.72)	38.29 (13.14)*
Trail Making B (time in seconds)	51.13 (11.67)	77.84 (19.83)*
(Trail A + Trail B) / Trail A (ratio)	3.22 (0.71)	3.14 (0.60)
Stroop (Reading – time in seconds)	38.19 (3.67)	42.26 (9.64)
Stroop (Color Naming – time in seconds)	61.19 (11.73)	61.47 (13.89)
Stroop (Inhibition – time in seconds)	89.19 (16.03)	111.47 (27.32)*
Stroop (Switching – time in seconds)	104.06 (14.36)	124.89 (23.40)*
Verbal Fluidity (number of words)	52.20 (9.64)	46.53 (14.22)

Standard deviations are in parentheses. *Statistically significant with $p < .05$.

Table 4.2

Results of RT and accuracy data for the Task (letter vs. color) \times Trial type (SP vs. SM vs. DM) \times Age (younger vs. older adults) ANCOVAs in the Priority and Equal conditions.

Levels	Accuracy															
	RT						Accuracy									
	Priority			Equal			Priority			Equal						
	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i> <	η_p^2	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i> <	η_p^2	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i> <	η_p^2				
Task	1,32	44.61	.001	.58	1,32	18.32	.001	.36	1,32	0.50	<i>ns</i>	.02	1,32	2.10	<i>ns</i>	.06
Trial Type	2,64	45.50	.001	.59	2,64	35.34	.001	.53	2,64	1.12	<i>ns</i>	.03	2,64	2.74	<i>ns</i>	.08
Age	1,32	5.50	.05	.15	1,32	9.67	.01	.23	1,32	0.19	<i>ns</i>	.01	1,32	1.99	<i>ns</i>	.06
Task \times Trial Type	2,64	10.53	.001	.25	2,64	9.08	.001	.22	2,64	0.45	<i>ns</i>	.01	2,64	1.27	<i>ns</i>	.04
Task \times Age	1,32	18.04	.001	.36	1,32	0.19	<i>ns</i>	.01	1,32	2.54	<i>ns</i>	.07	1,32	0.06	<i>ns</i>	.00
Trial Type \times Age	2,64	1.01	<i>ns</i>	.03	2,64	2.64	<i>ns</i>	.08	2,64	1.29	<i>ns</i>	.04	2,64	4.08	.05	.11
Task \times Trial Type \times Age	2,64	13.88	.001	.30	2,64	4.08	.05	.11	2,64	1.01	<i>ns</i>	.03	2,64	1.91	<i>ns</i>	.06

Table 4.3

Mean hemodynamic response (μM) variations observed at each of the 14 pairs of both hemispheres for Single Pure and Single Mixed conditions of the DT in younger adults

Pairs	Younger Adults													
	Single Pure				Single Mixed with Priority				Single Mixed with Equal Priority					
	Left Hem.		Right Hem.		Left Hem.		Right Hem.		Left Hem.		Right Hem.			
HbO	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR	
1	10.90±13.80	-1.25±14.15	11.14±8.37	-3.13±6.14	6.70±14.36	2.14±9.28	4.56±12.79	1.39±3.73	6.16±14.86	-0.84±5.73	5.87±9.41	-2.72±4.87		
2	9.89±12.42	-1.93±11.31	10.42±10.07	0.37±2.73	4.07±16.01	-1.77±5.78	3.29±13.68	-2.36±8.46	10.03±12.55	-1.78±5.64	5.54±12.58	1.40±7.30		
3	4.29±8.19	0.35±2.56	10.01±9.91	-1.29±2.38	-1.37±18.62	-0.49±3.84	0.77±16.61	-1.12±3.32	2.65±13.60	0.77±3.15	1.22±9.91	-1.29±3.13		
4	6.51±8.80	2.69±10.03	10.04±10.13	1.10±3.59	4.43±12.89	0.41±7.52	1.29±11.39	-0.98±5.79	8.13±14.03	-0.43±7.79	5.31±11.97	-0.30±3.47		
5	6.60±8.97	-2.08±9.57	10.17±11.60	2.61±7.50	1.28±12.98	0.78±4.37	3.90±17.42	-0.78±6.42	6.13±14.91	0.08±3.01	7.20±11.05	-0.18±6.17		
6	6.33±9.27	0.17±3.90	9.42±11.09	-1.96±3.22	-2.66±16.22	-0.25±2.66	0.40±14.54	-1.06±3.52	3.71±12.84	0.45±3.57	1.63±10.12	-0.96±2.14		
7	4.86±8.34	0.17±2.71	5.26±9.05	-2.58±4.81	-2.83±11.74	0.71±4.52	-5.15±15.32	-1.88±3.83	1.86±10.37	0.48±2.85	-1.65±7.42	-0.81±2.79		
8	5.14±8.28	1.45±4.48	7.79±11.54	-1.78±4.13	0.52±12.85	0.73±5.22	-0.86±9.96	-2.49±6.08	7.39±12.39	-2.82±9.46	1.54±12.66	-0.61±5.49		
9	3.54±11.96	-1.58±5.37	1.97±7.65	-3.68±11.39	0.25±11.05	-1.00±4.85	3.09±10.50	-0.66±9.19	1.40±13.05	0.87±8.34	1.80±9.61	-0.47±6.34		
10	3.10±9.15	-0.86±3.84	-0.04±7.73	-1.86±6.46	0.40±10.63	-0.13±6.38	-6.68±14.41	-1.00±6.48	-0.14±8.12	-0.05±4.57	-5.89±12.94	-0.62±5.30		
11	2.01±8.01	-0.29±7.39	-1.17±7.34	-0.26±5.31	3.21±10.28	-1.56±8.42	-6.35±17.66	0.30±6.86	-2.33±9.00	-0.11±6.48	-7.47±9.42	-2.16±5.98		
12	5.64±10.93	-2.64±9.51	1.38±9.59	3.65±18.33	-4.72±12.08	-0.26±5.33	-1.75±12.54	-0.01±5.93	2.08±9.61	-3.12±4.31	1.16±10.81	-4.01±5.42		
13	3.23±10.88	-2.40±12.33	-4.20±6.76	5.19±12.61	1.43±10.89	0.74±5.15	-3.77±16.27	-2.53±5.07	-1.31±9.63	1.05±6.36	-7.79±12.43	-2.81±11.34		
14	5.41±9.10	2.20±15.95	3.16±9.50	-2.21±9.59	-1.99±18.92	-1.40±8.93	-0.32±14.33	-0.83±5.71	-7.76±17.71	4.24±12.00	1.01±20.32	-1.61±9.82		

Standard errors follow \pm symbol.

Table 4.4
 Mean hemodynamic response (μM) variations observed at each of the 14 pairs of both hemispheres for Dual Mixed conditions in younger adults

Pairs	Younger Adults				Dual Mixed with Equal Priority			
	Dual Mixed with Priority		Right Hem.		Left Hem.		Right Hem.	
	HbO	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR
1	7.65 \pm 19.05	-3.10 \pm 9.04	7.78 \pm 12.88	0.06 \pm 4.62	11.79 \pm 27.58	1.93 \pm 5.01	5.82 \pm 13.03	-0.70 \pm 6.90
2	-2.30 \pm 19.52	5.92 \pm 11.31	6.60 \pm 11.51	3.76 \pm 7.59	4.03 \pm 23.55	-0.14 \pm 7.17	5.54 \pm 18.37	-0.92 \pm 8.47
3	9.28 \pm 15.27	2.16 \pm 9.56	8.75 \pm 19.82	0.98 \pm 8.79	2.05 \pm 9.71	1.20 \pm 2.97	8.35 \pm 14.79	1.10 \pm 3.68
4	10.07 \pm 18.59	-3.74 \pm 11.81	10.16 \pm 15.04	-0.51 \pm 9.62	4.21 \pm 17.01	3.87 \pm 10.84	8.06 \pm 16.58	1.43 \pm 4.45
5	12.17 \pm 16.47	-1.05 \pm 7.89	4.67 \pm 21.71	0.78 \pm 8.46	5.12 \pm 17.79	0.60 \pm 5.57	9.45 \pm 18.56	-1.09 \pm 12.27
6	7.87 \pm 16.54	2.38 \pm 8.32	7.83 \pm 18.27	0.61 \pm 8.68	8.73 \pm 17.35	1.86 \pm 4.05	9.88 \pm 15.49	-0.02 \pm 4.10
7	7.84 \pm 18.20	2.38 \pm 9.47	6.07 \pm 15.28	-0.21 \pm 6.24	6.64 \pm 13.17	2.58 \pm 4.04	5.36 \pm 13.89	-0.51 \pm 3.27
8	6.76 \pm 16.71	1.51 \pm 6.65	7.93 \pm 18.09	3.45 \pm 14.05	4.20 \pm 14.19	1.45 \pm 4.95	2.40 \pm 16.82	-2.32 \pm 8.76
9	3.78 \pm 21.17	1.18 \pm 6.58	3.73 \pm 12.27	1.84 \pm 8.84	4.24 \pm 11.35	-4.21 \pm 8.93	3.46 \pm 12.34	-3.22 \pm 10.67
10	10.29 \pm 14.17	2.91 \pm 11.00	7.86 \pm 9.34	1.33 \pm 8.85	4.73 \pm 11.23	0.65 \pm 2.89	6.68 \pm 21.91	0.05 \pm 5.71
11	4.63 \pm 16.35	0.54 \pm 7.87	3.09 \pm 14.74	-0.37 \pm 6.98	4.94 \pm 10.56	2.47 \pm 6.87	4.21 \pm 16.44	-1.46 \pm 6.12
12	3.20 \pm 12.34	-2.34 \pm 5.92	-0.42 \pm 18.86	1.28 \pm 12.41	-4.46 \pm 13.76	2.73 \pm 8.45	-2.18 \pm 11.80	-2.39 \pm 13.09
13	6.06 \pm 18.26	-2.33 \pm 10.02	2.81 \pm 13.28	-5.27 \pm 14.19	11.34 \pm 15.56	1.54 \pm 9.43	-1.54 \pm 19.74	-1.35 \pm 10.69
14	3.86 \pm 13.60	-4.53 \pm 7.34	-1.68 \pm 18.85	-0.64 \pm 7.66	4.34 \pm 17.27	0.28 \pm 13.60	-7.84 \pm 28.48	4.63 \pm 11.01

Standard errors follow \pm symbol.

Table 4.5

Mean hemodynamic response (μM) variations observed at each of the 14 pairs of both hemispheres for Single Pure and Single Mixed conditions of the DTf in older adults

Pairs	Older Adults															
	Single Pure				Single Mixed with Priority				Single Mixed with Equal Priority							
	Left Hem.		Right Hem.		Left Hem.		Right Hem.		Left Hem.		Right Hem.		HbO		HbR	
1	-1.91±10.45	0.20±1.68	1.95±9.69	0.30±1.59	-6.41±11.65	0.91±4.05	-3.94±13.51	0.28±1.97	-5.99±13.26	-0.09±2.99	-2.96±13.38	0.89±3.03				
2	1.27±12.51	-0.47±1.97	2.06±9.88	-0.85±1.69	-6.94±14.29	0.92±3.94	-6.02±12.58	0.40±1.90	-7.69±15.19	-0.30±1.87	-6.08±13.62	0.09±1.94				
3	0.44±9.16	0.37±2.08	2.68±7.17	-1.94±2.33	-7.60±11.89	1.11±3.74	-5.10±12.25	0.61±3.38	-5.11±11.32	-0.20±2.16	-6.91±13.64	-0.04±4.29				
4	0.96±8.98	-0.01±1.74	1.22±10.04	-0.65±2.17	-5.59±11.56	-0.11±1.47	-4.79±10.82	0.16±1.39	-8.06±11.59	0.39±2.12	-5.94±12.43	0.06±1.64				
5	0.14±8.30	-0.36±2.20	1.73±9.20	-0.41±2.53	-4.34±8.54	-0.07±2.03	-4.11±11.70	-0.24±2.17	-8.15±10.31	-0.39±1.48	-6.13±11.40	-0.38±1.84				
6	-0.38±8.16	0.71±2.01	0.80±8.58	-1.28±2.63	-5.76±13.84	0.55±2.96	-7.09±13.83	0.01±3.09	-3.38±11.06	1.67±4.10	-6.47±12.65	0.49±4.08				
7	-0.37±8.64	0.08±1.95	0.97±8.37	-0.78±2.18	-6.56±11.75	-0.42±2.90	-4.23±9.22	0.23±2.05	-5.55±11.72	0.30±3.23	-3.26±9.09	0.02±2.30				
8	-2.79±8.69	-0.29±2.61	-1.44±9.33	-1.00±2.25	-5.06±11.52	-0.78±4.25	-4.11±11.07	-0.84±3.44	-6.27±9.09	-0.82±2.99	-7.74±10.82	-0.73±1.70				
9	-2.37±7.61	-0.75±1.49	-2.96±6.90	-3.03±2.94	-6.36±9.28	-0.54±4.19	-5.50±9.99	-1.76±3.14	-4.78±9.52	-0.36±1.67	-3.69±8.67	-1.34±2.54				
10	-0.98±6.78	-0.56±1.93	-0.94±7.94	-1.19±2.32	-6.39±10.49	0.26±3.04	-4.07±8.56	-1.09±2.89	-3.54±7.99	0.29±3.09	-3.80±7.84	-0.34±2.48				
11	-0.23±4.99	-0.67±1.29	-1.36±7.35	-1.13±2.16	-2.47±9.22	0.28±3.36	-4.32±8.92	-1.13±2.20	-0.42±7.74	0.63±2.25	-4.98±8.10	-0.99±1.90				
12	-2.55±7.10	-0.91±2.13	-2.13±6.19	0.03±2.41	-4.38±8.51	-1.46±3.94	-6.76±9.78	-0.30±3.83	-6.92±8.32	-0.20±3.10	-6.09±7.82	-0.01±4.71				
13	-1.63±6.13	-0.11±2.09	-0.98±12.23	-1.23±2.59	-3.18±8.37	-0.57±2.90	-10.72±13.29	-0.40±2.27	-1.18±5.63	0.45±1.93	-11.56±21.27	-0.57±2.78				
14	-1.41±7.55	-0.56±3.66	3.19±12.32	-2.21±2.14	-3.69±11.95	-0.78±2.82	-8.83±11.75	-2.06±3.60	-6.63±8.71	-1.24±2.97	-7.60±15.07	-1.10±2.81				

Standard errors follow \pm symbol.

Table 4.6
 Mean hemodynamic response (μM) variations observed at each of the 14 pairs of both hemispheres for Dual Mixed conditions in older adults

Pairs	Older Adults		Dual Mixed with Equal Priority						
	Dual Mixed with Priority			Left Hem.			Right Hem.		
	Left Hem.	HbR	HbO	HbR	HbO	HbR	Left Hem.	HbO	HbR
1	0.04±16.29	-0.77±2.93	0.02±13.24	-0.68±2.14	-0.49±16.73	-0.46±2.79	2.46±19.44	-0.77±1.55	
2	1.77±20.26	-0.48±3.52	2.43±17.71	-1.18±1.60	-0.49±20.78	-0.98±3.87	2.46±18.15	-1.24±2.68	
3	0.74±13.36	0.34±2.55	-2.21±17.33	-1.97±3.57	0.30±16.14	1.47±2.53	5.77±16.82	-0.71±3.99	
4	-2.01±14.34	-0.95±2.16	1.34±14.95	-1.31±1.85	1.30±17.03	-0.67±3.32	1.66±16.46	-1.44±2.39	
5	-1.35±13.97	-0.77±4.15	2.59±14.11	-1.62±4.10	-2.36±18.56	-1.43±3.10	2.70±16.09	-1.33±3.17	
6	1.50±16.95	-0.47±2.29	0.76±13.54	-0.83±3.00	-0.78±15.38	0.02±3.20	1.77±16.28	-0.86±3.13	
7	-1.14±17.17	-0.70±3.71	0.74±13.21	-1.15±2.07	-0.16±18.35	-0.68±3.26	0.36±10.68	0.03±3.20	
8	0.14±14.21	-2.73±4.39	-0.14±11.53	-0.19±3.79	-2.04±12.71	-1.17±3.83	3.26±15.28	-1.37±4.22	
9	0.16±13.97	-2.42±2.94	-1.40±11.64	-3.42±4.65	-1.54±13.19	-1.36±4.12	-2.63±11.01	-0.69±3.31	
10	-0.81±14.42	-0.89±2.76	-2.54±13.79	-1.73±3.17	-4.70±13.28	-0.02±4.08	-0.22±11.31	-0.76±3.57	
11	0.03±10.36	-1.20±2.55	-3.36±11.86	-1.29±3.32	-0.90±9.03	0.73±4.67	0.70±12.39	-0.37±3.64	
12	0.04±12.92	-1.86±3.44	-8.23±17.25	-0.32±5.02	0.87±15.13	0.40±5.68	-7.61±29.52	-1.23±6.73	
13	-0.04±11.50	-0.37±4.20	-9.30±24.05	0.63±5.18	0.84±12.27	0.09±2.75	-2.72±19.20	1.11±3.96	
14	0.11±12.68	-1.78±4.34	-1.84±17.21	-0.74±4.48	1.41±15.95	-0.26±5.25	-8.73±18.66	0.80±5.24	

Standard errors follow \pm symbol.

4.10 Figures

Figure Captions

Figure 4.1 The figure illustrates the ABBA design of the experiment with Color and Letter tasks in Pure and Mixed trials. Note that half of the participants started with priority instructions while the other half started with equal instructions and in the second mixed block the participants switched to the alternate set of instructions (i.e., those who started with Priority switched to Equal instructions and those that started with Equal switched to Priority instructions).

Figure 4.2 The upper graph shows reaction times and the lower graph accuracy for both younger and older adults. Error bars represent standard deviations.

Figure 4.3 The upper graph shows RT costs and the lower graph accuracy costs for both younger and older adults. Error bars represent standard deviations.

Figures 4.4 and 4.5 should be put one above the other in order to compare the two blocks.

Figures 4.4 and 4.5 Representation of significant results for younger adults in the optode array for HbO and HbR in the SP, SM and DM conditions. The upper figure (figure 4.4) displays results of the Priority condition, while the lower figure (figure 4.5) displays results of the Equal condition. The sources are represented by blue circles and the detectors are represented by orange squares. The anterior and posterior designations have been added to the DLPFC and the VLPFC by adding "a" and "p" respectively. Pair numbers are next to the light blue lines. Connectors above the X axis represent significant contrasts for HbO, while connectors below the X axis represent the significant contrasts for HbR.

Figures 4.6 and 4.7 should be put one above the other in order to compare the two blocks.

Figures 4.6 and 4.7 Representation of significant results for younger adults in the optode array for HbO and HbR in the SP, SM and DM conditions. The upper figure (figure 4.6) displays results of the Priority condition, while the lower figure (figure 4.7) displays results of the Equal condition. The sources are represented by blue circles and the detectors are represented by orange squares. The anterior and posterior designations have been added to the DLPFC and the VLPFC by adding “a” and “p” respectively. Pair numbers are next to the light blue lines. Connectors above the X axis represent significant contrasts for HbO, while connectors below the X axis represent the significant contrasts for HbR.

Figure 4.1

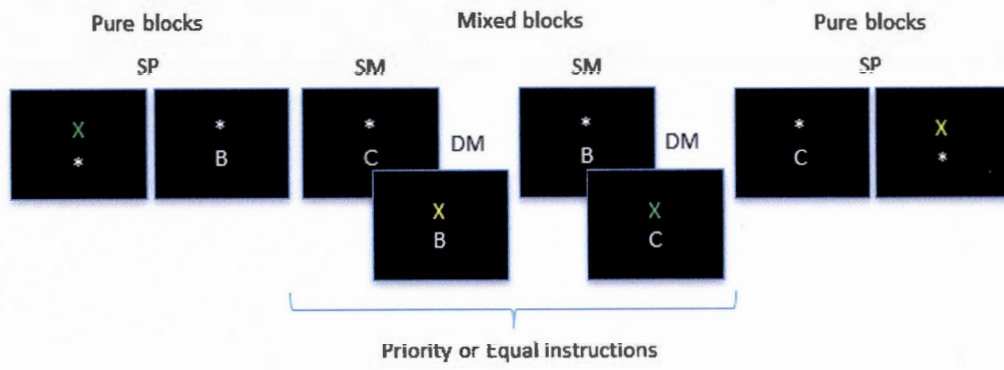


Figure 4.2

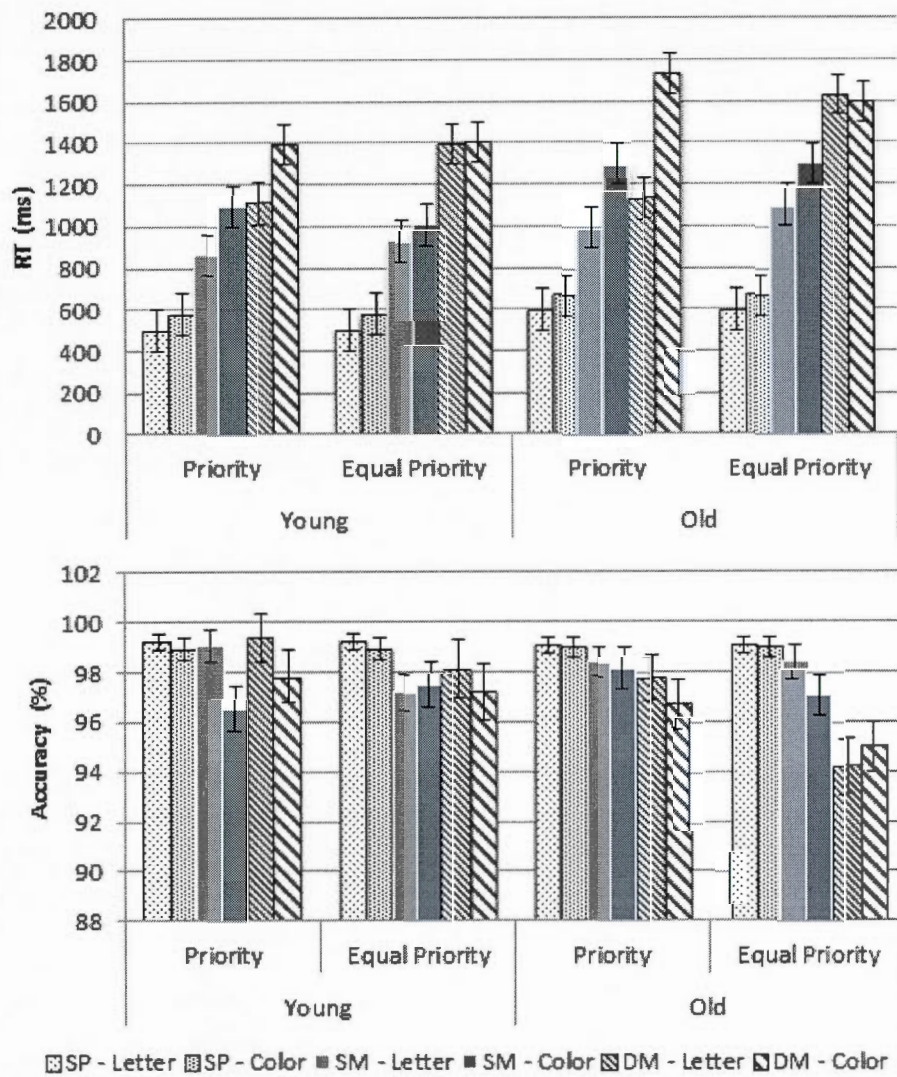


Figure 4.3

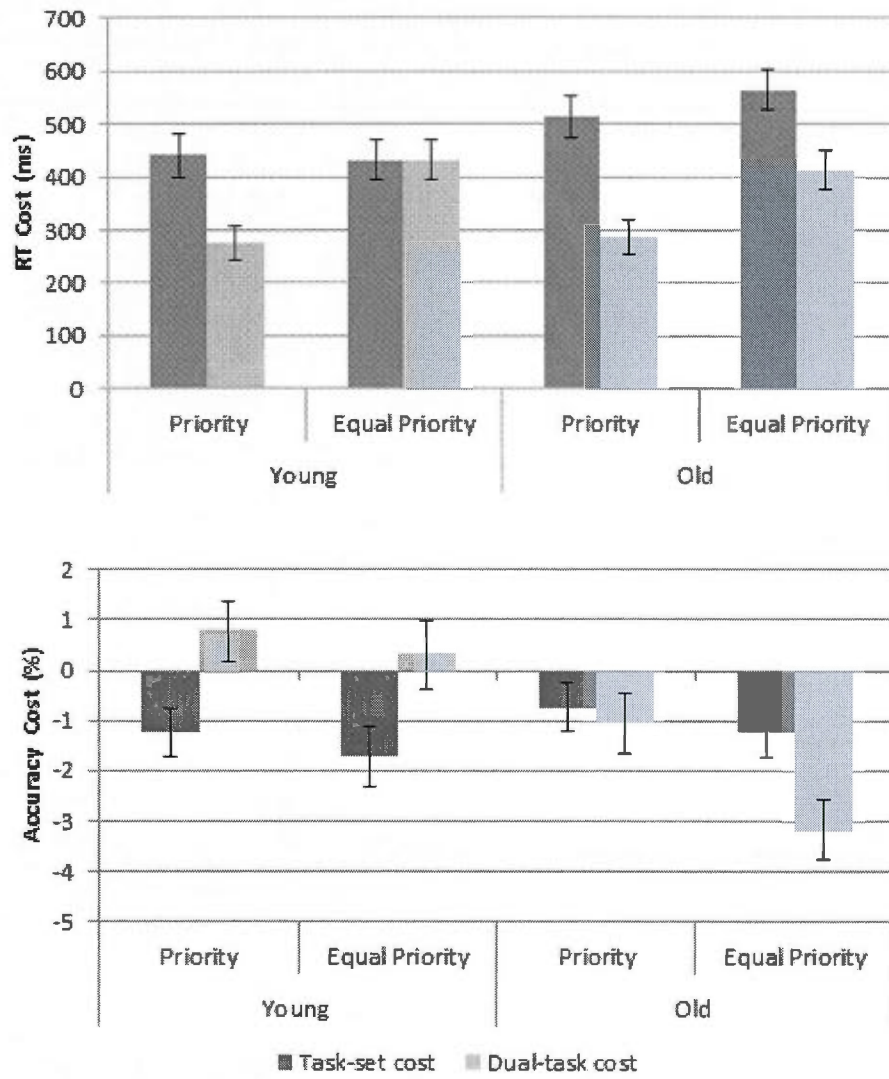


Figure 4.4

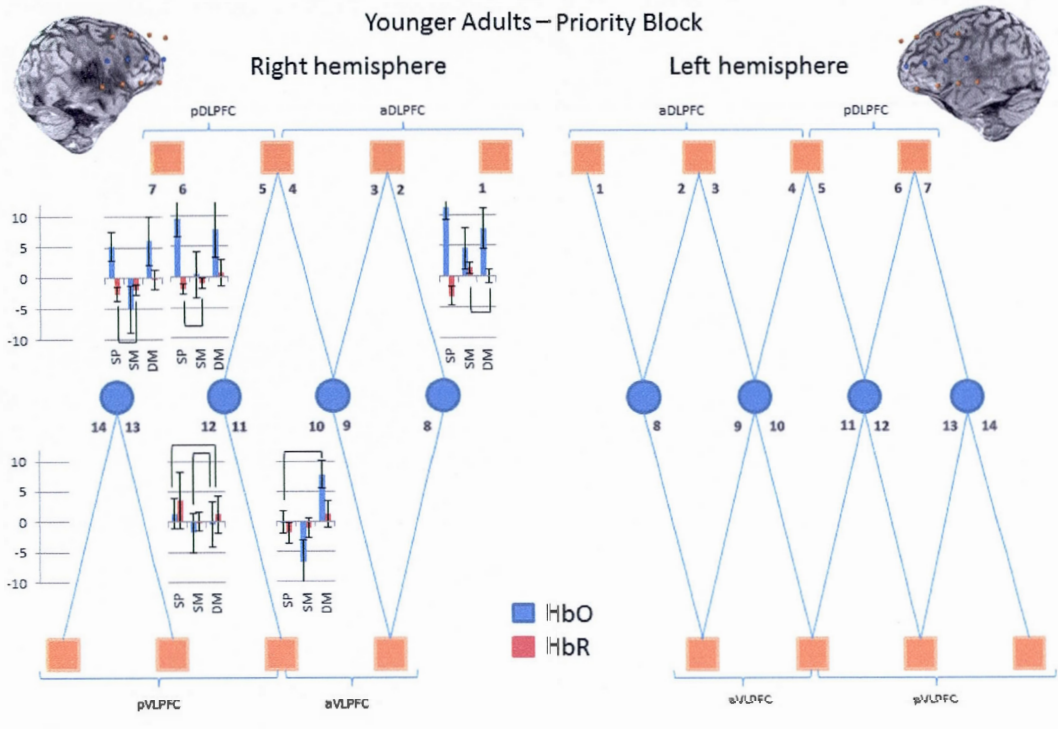


Figure 4.5

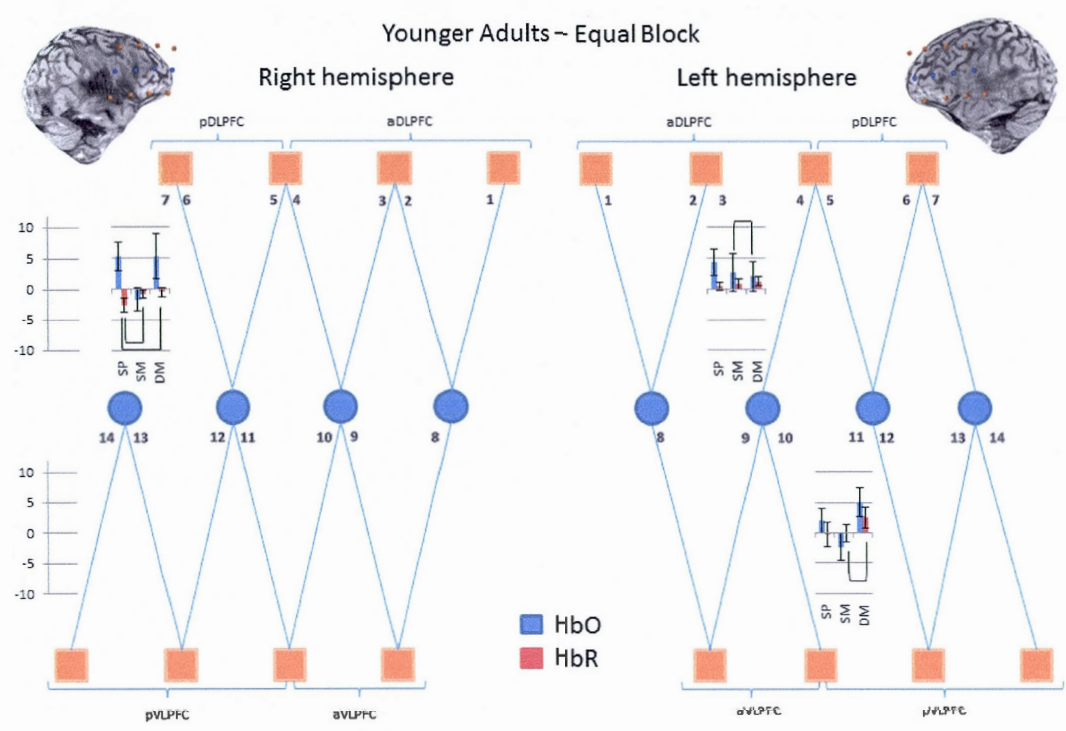


Figure 4.6

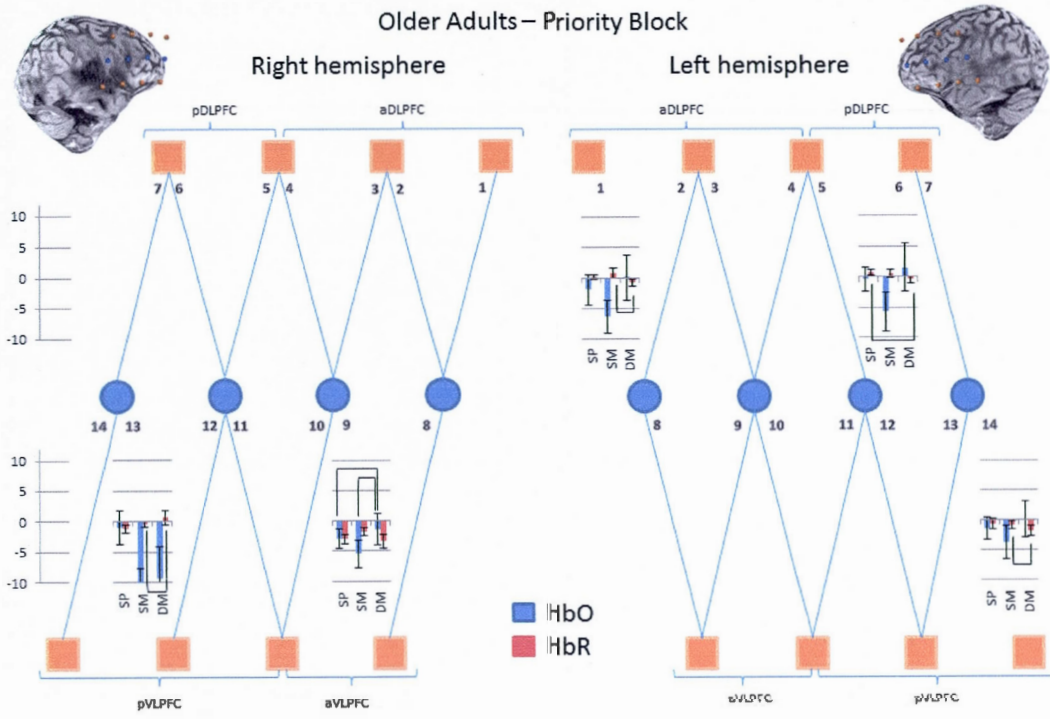
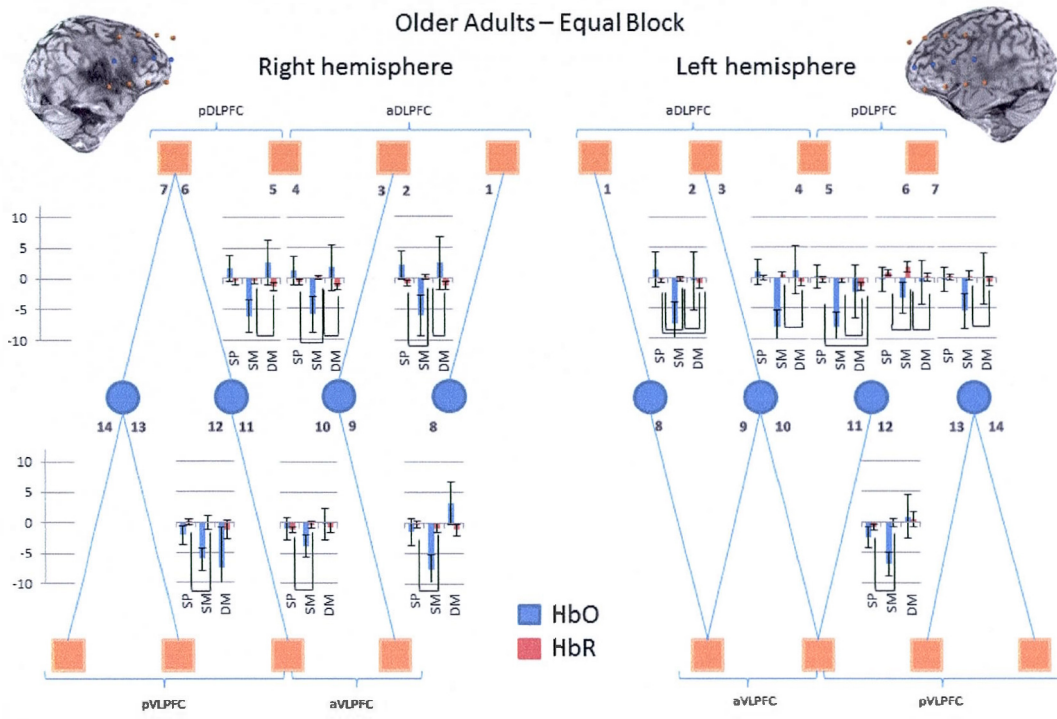


Figure 4.7



4.11 References

- Bherer, L., Kramer, A. F., Peterson, M. S., Colcombe, S., Erickson, K., & Becic, E. (2005). Training effects on dual-task performance: are there age-related differences in plasticity of attentional control? *Psychology and aging*, 20(4), 695-709.
- Boas, D., Dale, A. M., & Franceschini, M. A. (2004). Diffuse optical imaging of brain activation: approaches to optimizing image sensitivity, resolution and accuracy. *NeuroImage*, 23, S275-S288.
- Cohen-Adad, J., Chapuisat, S., Doyon, J., Rossignol, S., Lina, J. M., Benali, H., et al. (2007). Activation detection in diffuse optical imaging by means of the general linear model. *Med Image Anal*, 11(6), 616-629.
- Cope, M., Delpy, D. T., Reynolds, E. O., Wray, S., Wyatt, J., & van der Zee, P. (1988). Methods of quantitating cerebral near infrared spectroscopy data. *Adv Exp Med Biol*, 222, 183-189.
- Delpy, D. T., & Cope, M. (1997). Quantification in tissue near-infrared spectroscopy. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 352, 649-659.
- Devor, A., Tian, P., Nishimura, N., Teng, I. C., Hillman, E. M., Narayanan, S., et al. (2007). Suppressed neuronal activity and concurrent arteriolar vasoconstriction may explain negative blood oxygenation level-dependent signal. *The Journal of Neuroscience*, 27(16), 4452-4459.
- Dreher, J. C., & Grafman, J. (2003). Dissociating the roles of the rostral anterior cingulate and the lateral prefrontal cortices in performing two tasks simultaneously or successively. *Cereb Cortex*, 13(4), 329-339.
- Duncan, A., Meek, J. H., Clemence, M., Elwell, C. E., Fallon, P., Tyszczuk, L., et al. (1996). Measurement of cranial optical path length as a function of age using phase resolved near infrared spectroscopy. *Pediatric Research*, 39, 889-894.
- Ehrsson, H. H., Geyer, S., & Naito, E. (2003). Imagery of voluntary movement of fingers, toes, and tongue activates corresponding body-part-specific motor representations. *Journal of Neurophysiology*, 90(5), 3304-3316.
- Erickson, K. I., Colcombe, S. J., Wadhwa, R., Bherer, L., Peterson, M. S., Scalf, P. E., et al. (2007). Training-induced plasticity in older adults: effects of training on hemispheric asymmetry. *Neurobiol Aging*, 28(2), 272-283.
- Folstein, M. F., Robins, L. N., & Helzer, J. E. (1983). The Mini-Mental State Examination. *Arch Gen Psychiatry*, 40(7), 812.

- Hartley, A. A. (2001). Age differences in dual-task interference are localized to response-generation processes. *Psychol Aging*, 16(1), 47-54.
- Hartley, A. A., Jonides, J., & Sylvester, C. Y. (2011). Dual-task processing in younger and older adults: similarities and differences revealed by fMRI. *Brain Cogn*, 75(3), 281-291.
- Herath, P., Klingberg, T., Young, J., Amunts, K., & Roland, P. (2001). Neural correlates of dual task interference can be dissociated from those of divided attention: an fMRI study. *Cereb Cortex*, 11(9), 796-805.
- Hoshi, Y. (2003). Functional near-infrared optical imaging: Utility and limitations in human brain mapping. *Psychophysiology*, 40, 511-520.
- Huppert, T. J., Hoge, R. D., Diamond, S. G., Franceschini, M. A., & Boas, D. A. (2006). A temporal comparison of BOLD, ASL, and NIRS hemodynamic responses to motor stimuli in adult humans. *Neuroimage*, 29(2), 368-382.
- Jiang, Y. (2004). Resolving dual-task interference: An fMRI study. *NeuroImage*, 22, 748-754.
- Jiang, Y., Saxe, R., & Kanwisher, N. (2004). Functional magnetic resonance imaging provides new constraints on theories of the psychological refractory period. *Psychological Science*, 15, 390-396.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Kramer, A. F., & Madden, D. J. (2008). Attention. In F. I. M. Craik, Salthouse, T.A. (Ed.), *The Handbook of Aging and Cognition* (pp. 189-250). New York (NY): Psychology Press, Taylor and Francis Group.
- Lague-Beauvais, M., Brunet, J., Gagnon, L., Lesage, F., & Bherer, L. (2013). A fNIRS investigation of switching and inhibition during the modified Stroop task in younger and older adults. *Neuroimage*, 64, 485-495.
- Lien, M.-C., & Proctor, R. W. (2002). Stimulus-response compatibility and psychological refractory period effects: Implications for response selection. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9, 212-238.
- Obrig, H., & Villringer, A. (2003). Beyond the visible: Imaging the human brain with light. *J Cereb Blood Flow Metab*, 23, 1-18.
- Okamoto, M., Dan, H., Sakamoto, K., Takeo, K., Shimizu, K., Kohno, S., et al. (2004). Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10-20 system oriented for transcranial functional brain mapping. *Neuroimage*, 21(1), 99-111.

- Park, D. C., & Reuter-Lorenz, P. (2009). The adaptive brain: aging and neurocognitive scaffolding. *Annu Rev Psychol*, 60, 173.
- Pashler, H., & Johnston, J. C. (1998). Attentional limitations in dual-task performance. In H. Pashler (Ed.), *Attention* (pp. 155-189). Hove, England: Psychology Press, Erlbaum (UK), Taylor and Francis.
- Pfurtscheller, G., Ortner, R., Bauernfeind, G., Linortner, P., & Neuper, C. (2010). Does conscious intention to perform a motor act depend on slow cardiovascular rhythms? *Neurosci Lett*, 468(1), 46-50.
- Raz, N., Ghisletta, P., Rodrigue, K. M., Kennedy, K. M., & Lindenberger, U. (2010). Trajectories of brain aging in middle-aged and older adults: regional and individual differences. *Neuroimage*, 51(2), 501-511.
- Ruthruff, E., Pashler, H. E., & Hazeltine, E. (2003). Dual-task interference with equal task emphasis: graded capacity sharing or central postponement? *Percept Psychophys*, 65(5), 801-816.
- Schubert, T., & Szameitat, A. J. (2003). Functional neuroanatomy of interference in overlapping dual tasks: an fMRI study. *Brain Res Cogn Brain Res*, 17(3), 733-746.
- Sigman, M., & Dehaene, S. (2008). Brain mechanisms of serial and parallel processing during dual-task performance. *J Neurosci*, 28(30), 7585-7598.
- Strangman, G., Franceschini, M. A., & Boas, D. A. (2003). Factors affecting the accuracy of near-infrared spectroscopy concentration calculations for focal changes in oxygenation parameters. *Neuroimage*, 18(4), 865-879.
- Szameitat, A. J., Schubert, T., Muller, K., & Von Cramon, D. Y. (2002). Localization of executive functions in dual-task performance with fMRI. *J Cogn Neurosci*, 14(8), 1184-1199.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2001). *Using Multivariate Statistics* (4 ed.). Needham Heights (MA): Allyn & Bacon.
- Turner, G. R., & Spreng, R. N. (2012). Executive functions and neurocognitive aging: dissociable patterns of brain activity. *Neurobiol Aging*, 33(4), 826. e821-826. e813.
- Verhaeghen, P. (2011). Aging and executive control: reports of a demise greatly exaggerated. *Current Directions in Psychological Science*, 20(3), 174-180.
- Vince, M. A. (1948). The intermittency of control movements and the psychological refractory period. *British Journal of Psychology. General Section*, 38(3), 149-157.

Welford, A. T. (1952). An apparatus for use in studying serial performance. *Am J Psychol*, 65(1), 91-97.

Yesavage, J. A. (1988). Geriatric Depression Scale. *Psychopharmacol Bull*, 24(4), 709-711.

CHAPITRE V

DISCUSSION GÉNÉRALE

La littérature scientifique est en accord général avec le fait que les fonctions exécutives, qui reposent sur l'intégrité des lobes frontaux, déclinent avec l'âge (Park & Reuter-Lorenz, 2009; Raz, 2000). Étant donné que le contrôle attentionnel est principalement géré par les lobes frontaux, et que le concept n'est pas en soi unitaire, tel qu'observé dans les études lésionnelles (Stuss & Alexander, 2000) ou encore factorielles (Miyake, et al., 2000), il est important de déterminer comment ces mécanismes (inhibition, alternance et attention divisée) se dissocient avec l'âge. La présente thèse tente d'établir la dissociation de ces mécanismes au cours du vieillissement. La première étude (chapitre 3) compare directement les mécanismes de l'inhibition et de l'alternance chez les jeunes et les aînés, à l'aide de la spectroscopie proche infra-rouge fonctionnelle (SPIRF) au niveau du cortex préfrontal (CPF). La seconde étude (chapitre 4) explore l'effet de priorisation en attention divisée chez les jeunes et les aînés dans le CPF, également à l'aide de la SPIRF. La discussion qui suit résume les résultats obtenus et tente de déterminer l'évolution des mécanismes étudiés chez de jeunes adultes et des personnes âgées. On présentera ensuite les limites de la recherche, avec un avant-goût des recherches à venir.

5.1 Rappel de la première étude

La première étude de cette thèse avait pour but d'identifier les corrélats neurophysiologiques au niveau du lobe frontal de deux mécanismes du contrôle attentionnel, soit l'alternance et l'inhibition. À notre connaissance, aucune étude n'avait comparé ces deux mécanismes à l'intérieur d'un même paradigme, chez des participants de deux populations

différentes. Cet objectif a pu être atteint en comparant les performances de jeunes adultes et d'aînés ayant complété une tâche de Stroop modifiée, incluant des conditions d'interférence (mesurant l'inhibition) et d'alternance, tant au niveau comportemental que neurophysiologique.

Tel que montré dans des études précédentes (e.g., Bohnen, et al., 1992), cette dichotomie entre inhibition et alternance a aussi été révélée par les résultats comportementaux. La présente étude suggère que les jeunes adultes et les personnes âgées répondent plus lentement et de façon moins précise aux tâches demandant les fonctions exécutives, telles que l'inhibition et l'alternance, lorsqu'elles sont comparées à une condition de base, soit une épreuve de dénomination. De plus, les aînés ont produit des réponses plus lentes que les jeunes adultes dans toutes les conditions de la tâche. Tel qu'attendu, pour les deux variables dépendantes étudiées, soient les temps de réaction (TR) et l'exactitude, le coût de l'inhibition était inférieur à celui de l'alternance pour les deux populations. Concernant l'exactitude, seul le coût lié à l'alternance était plus grand chez les aînés que chez les jeunes adultes. En lien avec d'autres études (Schroeter, et al., 2003; Zysset, et al., 2007), ces résultats montrent un ralentissement général des TR chez les aînés, particulièrement dans les tâches d'alternance.

Les résultats psychophysologiques de cette étude correspondent à ceux énoncés par la littérature, qui rapporte des données d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) et SPIRf, et suggère des différences et des similitudes entre les patrons d'activation pendant l'inhibition (Schroeter, et al., 2003; Zysset, et al., 2007), et l'alternance (DiGirolamo, et al., 2001; Gold, et al., 2010), chez les jeunes adultes et les aînés. Les mesures en SPIRf ont permis de déterminer que, bien que l'inhibition ne révélait pas d'activation significative par rapport aux conditions non exécutives dans le cortex préfrontal chez les jeunes, l'alternance, quant à elle, induisait une augmentation bilatérale de l'activation au niveau du cortex préfrontal dorso-latéral (CPF DL) antérieur, et du cortex préfrontal ventro-latéral (CPF VL) antérieur. Chez les aînés, une activation isolée au niveau du CPF DL bilatéral antérieur a été observée dans la condition de dénomination, soit celle n'impliquant pas les fonctions exécutives, alors que la condition d'interférence a créé une activation principalement

localisée dans le CPFDL postérieur gauche et dans le CPFVL bilatéral, avec une petite composante localisée au niveau du CPFDL antérieur droit. Au niveau de l'alternance chez les personnes âgées, on assiste à un étalement de l'activation dans le CPFDL antérieur bilatéral, le CPFVL bilatéral et au niveau du CPFDL postérieur gauche. Ces résultats suggèrent que chez les jeunes adultes et les aînés, l'inhibition et l'alternance sont associées à des patrons d'activation frontale distincts, et qu'il existe des différences d'activation liées à l'âge. De telles différences nous indiquent que l'activation préfrontale s'étend à différents sites chez les personnes âgées. On trouve ainsi une plus grande utilisation des ressources frontales dans les tâches exécutives chez les aînés.

Lorsqu'on tente de lier les résultats de cette étude aux diverses théories du vieillissement cognitif, les modèles peuvent être appliqués à divers degrés. Le modèle CRUNCH (Reuter-Lorenz & Cappell, 2008; Reuter-Lorenz & Park, 2010) établit que les aînés ne recrutent pas les ressources neuronales efficacement, causant un échec au niveau de la résolution de la compétition entre les régions cérébrales, et menant à une activation diffuse de moindre amplitude que chez les jeunes adultes. Au niveau physiologique, l'activation cérébrale équivalente pour les essais de dénomination et d'interférence peut être liée à un recrutement frontal compensatoire chez les aînés dans les conditions non exécutives, laissant moins de ressources neuronales afin de gérer les nouvelles demandes exécutives, tel que prédit par le modèle CRUNCH. Par contre, dans cette la présente étude par contre, les personnes âgées ont davantage engagé les régions préfrontales lorsqu'ils utilisaient le mécanisme d'alternance, comme si une composante exécutive additionnelle augmentait les demandes du cortex préfrontal, et qu'on assistait alors à une augmentation des ressources disponibles. Cette observation est plus en lien avec le modèle STAC (Park & Reuter-Lorenz, 2009), qui propose qu'une augmentation de l'activité avec l'âge, particulièrement dans le cortex préfrontal, peut être expliquée par la croissance de circuits additionnels au fur et à mesure que le cerveau se réorganise. La dédifférenciation de l'activation trouvée dans le mécanisme d'alternance, combiné aux pauvres performances comportementales chez les aînés, appuie ce modèle. De plus, puisque l'alternance a été associée avec une activation étendue au niveau des différentes régions de l'hémisphère gauche, avec une petite composante bilatérale chez les jeunes adultes et presque également distribuée entre les deux

hémisphères chez les aînés, il semblerait que le patron corresponde partiellement au modèle HAROLD (Cabeza, et al., 2002). Pourtant, l'appui à ce modèle reste limité, puisque l'augmentation de l'activation bilatérale observée chez les aînés a aussi été visualisée dans des régions similaires chez les jeunes adultes.

5.2 Deuxième étude

Cette deuxième étude évalue l'influence de différents types d'instructions de la priorisation des tâches sur les différences d'âges au niveau comportemental, et des patrons d'activation cérébrale fonctionnels au niveau du cortex préfrontal. Les jeunes adultes et les aînés ont complété un paradigme de double-tâche (DT), alors que l'activité cérébrale du cortex préfrontal était mesurée à l'aide de la SPIRF.

Lors de la condition priorisée, les résultats en imagerie chez les jeunes adultes montrent que les essais SP créent un changement de concentration isolé dans le CPFDL postérieur droit lorsque comparés aux essais SM, ainsi qu'un changement de concentration isolé dans le CPFVL postérieur droit lorsque comparés aux essais DM. Tel que précédemment exposé dans la littérature (Hartley, et al., 2011; Jiang, 2004; Jiang, et al., 2004), les essais DM ont toutefois produit de plus grands changements de concentration dans les aires frontales antérieures droites, bien que Szameitat (2002), puis Schubert et Szameitat (2003), aient rencontré une activation bilatérale. Chez les aînés, les essais DM ont été les seuls à créer des changements de concentration significatifs dans le CPFVL droit antérieur et postérieur lorsque comparés aux essais SP ou SM, mais ils ont aussi largement recruté dans le CPFDL gauche et le CPFVL postérieur gauche, ce dont on ne trouve aucun exemple dans la littérature (Allen, Ruthruff, Elicker, & Lien, 2009).

Quant à la condition en priorité égale, les jeunes adultes ont répété le patron d'activation des essais SP qui ont montré un plus grand changement de concentration isolé dans le CPFDL postérieur droit, alors que les essais SM ont induit de plus grands changements de concentration dans le CPFVL postérieur et dans le CPFDL antérieur gauche. Aucun changement n'a été détecté pour les essais DM par rapport aux autres types d'essais. Les aînés ont présenté des différences de concentration isolées lors des essais SP comparés

aux essais SM dans le CPFDL antérieur droit, ainsi que dans le CPFDL et CPFVL postérieurs gauches. Par contre, lors des essais SM, des changements de concentration significatifs ont été visualisés de façon isolée dans le CPFVL antérieur et postérieur droits. De plus, les essais DM ont engagé le CPFDL bilatéral, corroborant les résultats d'Erickson, et al. (2007). Conséquemment, il semblerait que l'augmentation de concentration prédite entre les conditions priorisée et égale a été trouvée seulement chez les aînés, et non chez les jeunes adultes, révélant une dichotomie entre les deux populations dans leurs stratégies de gestion en double-tâche.

D'après les résultats, la façon dont les tâches sont priorisées est associée à différents patrons d'activation fonctionnelle dans les régions frontales, ce qui suggère la contribution de mécanismes cognitifs distincts lorsque de multiples tâches doivent être gérées. De plus, les jeunes adultes et les personnes âgées ont généralement produit des patrons d'activation différents avec HbO et HbR, et ces patrons sont influencés par les instructions de priorisation des tâches. L'absence de différences comportementales entre les jeunes adultes et les aînés dans la condition priorité et la contribution minimale du cortex préfrontal, laisse supposer que les instructions de priorité réduisent le coût de double-tâche, alors que les instructions de priorités égales sont associées à une augmentation des coûts comportementaux, ainsi qu'à l'étalement des variations de HbR chez les personnes âgées. Ces derniers résultats suggèrent que cette condition augmente les demandes exécutives des performances en double-tâche pour les aînés.

L'analyse des données nous informe que l'instruction de prioriser une tâche sur l'autre minimise l'impact causé par leur gestion combinée, même si ces tâches sont présentées de façon simultanée. Les participants recruteraient davantage les fonctions exécutives et les ressources attentionnelles lorsqu'ils doivent donner la même priorité aux deux tâches. Ainsi, les paradigmes de PRP ne sont peut-être pas les meilleures mesures de la capacité à exécuter des tâches simultanément, puisqu'on y demande toujours de compléter une tâche avant l'autre.

De plus, la comparaison des patrons d'activation des aînés et des jeunes adultes révèle deux types d'activation cérébrale dépendant de la demande de prioriser une tâche sur l'autre, ou de donner une priorité égale aux deux tâches, ce qui indique une augmentation de l'activation et une dédifférentiation psychophysiological lorsqu'une priorité égale est donnée aux deux tâches.

Quant à l'analyse de ces résultats en lien avec les théories cognitives du vieillissement, l'hypothèse CRUNCH établit que les aînés recrutent de façon inefficace les ressources. Cela crée une activation diffuse de moins grande amplitude que chez les jeunes adultes, étant donné que les diverses régions cérébrales ne peuvent résoudre la compétition entre ces dernières (Logan, et al., 2002; Reuter-Lorenz & Cappell, 2008; Reuter-Lorenz & Park, 2010). Puisque les essais SP n'employant pas (en théorie) les fonctions exécutives et où les participants portaient attention à une seule tâche, ont créé des changements de concentration chez les jeunes adultes et les personnes âgées, les résultats de cette étude dans les conditions utilisant les fonctions exécutives (SM et DM) ne peuvent être interprétés comme compensatoires chez les aînés, ou comme une réduction des ressources neuronales afin de gérer les nouvelles demandes exécutives. Par contre, les aînés de la présente étude ont davantage utilisé les régions préfrontales lors de la condition en priorité égale en DT, comme si une nouvelle composante exécutive augmentait les demandes du cortex préfrontal, dégageant ainsi de nouvelles ressources. Cette observation concorde avec la théorie STAC (Park & Reuter-Lorenz, 2009), qui propose que l'activité cérébrale augmente avec l'âge dans le cortex préfrontal, l'addition de nouveaux circuits se justifiant par la réorganisation du cerveau en réaction à l'augmentation des plaques, des dégénérescences neurofibrillaires et de l'atrophie générale. La dédifférentiation de l'activation trouvée dans la condition de priorité égale, combinée avec les faibles performances comportementales des aînés, appuient ce dernier modèle.

Étant donné que la condition en priorité égale est associée à une activation frontale au niveau de l'hémisphère gauche pour les essais SM chez les jeunes adultes, qu'aucune différence entre les essais SM et DM n'a été observée, et que l'activation est distribuée presque également entre les deux hémisphères dans les essais DM chez les aînés, il

semblerait que ce patron concorde partiellement avec le modèle HAROLD. D'après ce modèle, le vieillissement normal est associé à une diminution de la latéralisation de l'activation trouvée dans les tâches utilisant le CPF, telles que la mémoire de travail et les tâches de mémoire épisodique (Cabeza, 2002). Cette dissociation apparaît aussi dans la condition priorisée où les jeunes adultes activent uniquement l'hémisphère droit, et où les personnes âgées présentent un étalement de l'activation sur les deux hémisphères. Dans la condition en priorité égale, les aînés deviennent cependant moins efficaces, malgré la bilatéralisation de l'activation. Les corrélations montrent une augmentation de l'activation en lien avec une meilleure précision comme pour les jeunes adultes, mais aussi dans les temps de réponses, révélant que la compensation et l'étalement de l'activation aident certains aînés. Les résultats de cette étude s'appliquent donc plus facilement au modèle STAC et lui fournissent un appui supplémentaire.

5.3 Apport de la thèse

Le but de la thèse était de différencier divers mécanismes du contrôle attentionnel et de cartographier leur évolution au cours du vieillissement. Trois mécanismes ont été étudiés, soit l'inhibition, l'alternance et l'attention divisée. Les trois mécanismes ont révélé des patrons d'activation différents, et la priorisation des tâches en attention divisée a montré que l'établissement d'un ordre entre les tâches peut aider à diminuer la demande de ressources attentionnelles. La différence entre ces patrons d'activation s'est révélée particulièrement saillante chez les aînés. Les mécanismes du contrôle attentionnel se distinguent au cours du vieillissement, ce qui appuie les études ayant une vision mécanistique des fonctions exécutives, selon laquelle le contrôle exécutif est supporté par des mécanismes élémentaires de contrôle attentionnel associés à des régions différentes des lobes frontaux (Miyake, et al., 2000; Stuss & Alexander, 2000). Plus la demande au niveau exécutif était élevée, plus l'activation s'est étalée chez les aînés. Chez les jeunes, ces patrons se sont demeurés localisés.

En résumé, les principaux résultats de cette thèse montrent des patrons d'activation différents au niveau du cortex préfrontal entre les jeunes et les aînés plus marqués lorsque la demande sur les processus descendants augmente. Plus la demande est grande, plus on

observe de bilatéralité et ce, au sein des deux populations. Toutefois, des distinctions spécifiques doivent être attribuées aux différents mécanismes étudiés. Alors que les aînés ont principalement engagé le CPFVL bilatéral lors de la tâche d'inhibition, l'alternance a produit un étalement de l'activation dans le CPFDL antérieur bilatéral et du CPFDL postérieur gauche, en plus de l'activation trouvée dans le CPFVL bilatéral. Dans le paradigme d'attention divisée, on note que la priorisation d'une tâche sur l'autre en situation de double-tâche génère une activité importante du CPFVL bilatéral et du CPFDL gauche, ce que l'on constate également en situation d'alternance. La simultanéité d'exécution des tâches, quant à elle, engage plus globalement le CPFDL bilatéral. Ceci implique que la priorisation en situation de double-tâche engage des corrélats neurophysiologiques similaires à ceux de l'alternance, tandis que de donner une priorité égale augmente et transforme la demande descendante, créant de ce fait une dissociation marquée au niveau des mécanismes du contrôle attentionnel. À partir de la dissociation des résultats trouvés chez les personnes âgées, il est possible de conclure que les mécanismes du contrôle attentionnel, soit l'inhibition, l'alternance et l'attention divisée, sont distincts, mais que les paradigmes d'attention divisée donnant une priorité à l'une des tâches utilisent principalement les mécanismes de l'alternance, et diminuent la demande cognitive par rapport aux paradigmes donnant une priorité égale aux deux tâches. La présente thèse supporte donc qu'il est possible de dissocier les mécanismes du contrôle attentionnel, et que ceux-ci peuvent être visualisés à l'aide d'une technique d'imagerie telle que la SPIRF. De plus, les résultats de cette thèse ont contribué à établir que ces derniers sont atteints de façon différentielle par l'âge.

Tant au niveau de l'inhibition, de l'alternance ou de l'attention divisée, il semble que la théorie du vieillissement s'appliquant le mieux pour expliquer les résultats soit le modèle *Scaffolding Theory of Aging and Cognition* (STAC). Cette hypothèse établit que les aînés réussissent à maintenir un haut niveau de fonctionnement grâce à l'engagement continu d'un échafaudage compensatoire. En effet, le recrutement de circuits additionnels soutient les structures en déclin, dont le fonctionnement est influencé par une inefficacité de la transmission du signal. L'activation cérébrale comprend donc les circuits défectueux et les circuits compensatoires associés, afin de faire face aux demandes de la tâche (Park & Reuter-Lorenz, 2009). Ces échafaudages seraient particulièrement proéminents au niveau du cortex

préfrontal, reconnu par plusieurs études pour la sur-activation associée aux tâches (Park & Reuter-Lorenz, 2009). De plus, ces derniers ne se développent pas de façon arbitraire au niveau cérébral. L'échafaudage aurait tendance à se développer dans des structures controlatérales et homologues aux structures lésées par le vieillissement, ou dans les aires adjacentes aux lésions (Park & Reuter-Lorenz, 2009). Une augmentation de l'activation bilatérale ou des structures adjacentes traduirait donc un échafaudage particulièrement efficace. Cet échafaudage pourrait aussi être révélé dans les aires activées par de plus grandes demandes cognitives chez les jeunes adultes.

5.4 Limites

5.4.1 Problèmes spécifiques à la recherche en vieillissement

Les études comportementales utilisant l'imagerie en vieillissement ont des problématiques méthodologiques propres. Le problème le plus flagrant au niveau expérimental, et que l'on retrouve pour toutes les populations spécifiques, est l'impossibilité de distribuer les participants de façon aléatoire dans les divers groupes expérimentaux, ce qui crée des résultats de nature corrélacionnelle plutôt que causale (Fabiani, 2012). Logiquement, seuls des aînés peuvent faire partie du groupe des personnes âgées, et seuls de jeunes adultes peuvent figurer dans le groupe des jeunes. L'assignation aléatoire à ces groupes n'est pas envisageable, les groupes étant définis par des caractéristiques inhérentes aux participants. Cet obstacle complique la compréhension des changements observés ; ceux-ci représentent-ils un changement quantitatif par rapport à la maturation des individus, ou s'agit-il d'un changement qualitatif, soit l'émergence de nouveaux processus ou de stratégies absents à un âge plus jeune, ou encore la perte de processus (Craik & Bialystok, 2006; Fabiani, 2012) ? Un changement abrupt dans les fonctions cognitives, par exemple, pourrait être dû à une maladie, mais cette dernière ne serait pas détectée puisque la personne n'aurait pas été suivie au cours d'une période de temps étendue, d'où l'ajout d'une variable confondante dans le design expérimental. La sélection des participants est aussi une source de préoccupations

quant à la méthodologie, étant donné que les personnes âgées se portant volontaires pour ce type d'expériences sont habituellement plus en santé que la moyenne. Capables de passer plusieurs heures dans un laboratoire de recherche, elles sont en outre sélectionnées d'après les critères de sélection sévères des diverses études (e.g., pas de maladie coronarienne, pas d'indices de démence, pas de chirurgie dans la dernière année; Fabiani, 2012). Plus les participants sont âgés, plus ces mêmes critères deviennent stricts, causant ainsi la surreprésentation d'une partie de la population âgée.

5.4.2 Problèmes liés à l'imagerie

Étant donné l'hypothèse du ralentissement général telle qu'émise par Salthouse et Somberg (1982), les techniques d'imagerie utilisant le flux sanguin (i.e., SPIRf ou IRMf) comme indicateur d'activation sont trop lentes pour révéler les nuances de ce ralentissement, puisque ce dernier se calcule en millisecondes et que la réponse hémodynamique est visible sur une échelle de quelques secondes (Fabiani, 2012). Il faut alors se tourner vers les potentiels évoqués (ERP) ou le signal optique lié à un événement (EROS), mais ces techniques n'offrent pas la résolution disponible en imagerie par résonance magnétique. Afin de localiser l'activation cérébrale, plusieurs études ont suivi le système 10x20 (Jasper, 1958), tel qu'utilisé en électroencéphalographie (EEG). La technique permet donc seulement une estimation de la localisation de l'activation cérébrale au niveau du cortex, et ne peut mesurer les structures sous-corticales.

Les limites de la SPIRf incluent la profondeur limitée de la pénétration et de la diffusion de la lumière, ce qui réduit la résolution spatiale (Boas, Dale, & Franceschini, 2004). Conséquemment, nous n'avons pas pu capter l'activation provenant du cortex cingulaire antérieur ou des structures sous-corticales, souvent rapportée dans les études sur le contrôle attentionnel (Dreher & Grafman, 2003; Hartley, et al., 2011; Jiang, 2004; Jiang, et al., 2004; Marois, 2005; Schubert & Szameitat, 2003). D'autre part, plusieurs études portant sur le contrôle attentionnel, et plus particulièrement utilisant les paradigmes d'alternance de DT ou PRP, rapportent une augmentation de l'activation du cortex pariétal (e.g., Dreher &

Grafman, 2003; Hartley, et al., 2011; Jiang, 2004; Jiang, et al., 2004; Marois, 2005; Mariano Sigman & Dehaene, 2005), mais à cause du positionnement des optodes, les changements de concentration de cette région n'ont pu être mesurés. La décision de mesurer uniquement l'activation du lobe frontal a été prise, les différences neuronales étant particulièrement marquées dans cette aire pour les paradigmes mesurant le contrôle attentionnel. Toutefois, le manque de mesure permettant de couvrir l'entièreté du parenchyme cérébral demeure une limite technique des études rapportées dans cette thèse. Conséquemment, les conclusions doivent se limiter aux différences de contribution des lobes frontaux.

La résolution spatiale de l'imagerie optique pose aussi ses limites à l'évaluation des corrélats neurophysiologiques. Si la résolution de l'IRMf est au millimètre prêt, celle de l'imagerie optique est similaire à celle de l'EEG (Ekkekakis, 2009). Il se peut donc que certaines activations n'aient pas été détectées, étant donné le manque de résolution spatiale. Cette limite pourrait expliquer pourquoi dans l'étude I, aucune activation n'a été observée chez les jeunes dans la condition d'interférence, alors que les études utilisant l'IRMf ont souvent reconnu des activations préfrontales dans les conditions incohérentes de Stroop chez les jeunes adultes.

Une dernière limite est commune à tout type d'imagerie basé sur le système hémodynamique, tel que l'IRMf, la tomographie par émission de positrons, et la SPIRf. Ces techniques d'imagerie se basent sur le couplage neurovasculaire entre les demandes métaboliques des neurones activées par une tâche, et les changements locaux en approvisionnement en sang (Lou, et al., 1987). Étant donné que pour ces techniques, les images ne peuvent être acquises qu'en examinant la relation entre les capillaires sanguins et les neurones à étudier, et que la distribution de ces capillaires est disparate au niveau cérébral, il devient impossible de comparer les différentes régions cérébrales entre elles directement. Le signal dépend donc directement de la position physique et de la densité du lit capillaire à un endroit précis, ainsi que de la distribution de valves myogènes contrôlant le flux sanguin à ces lits capillaires (Harrison, et al., 2002). En conséquence, si l'on trouve un lit capillaire dense à un endroit spécifique, et que deux centimètres plus loin l'épaisseur de ce lit est réduite du quart ou de moitié, le signal détecté dans ce deuxième lit capillaire sera réduit, portant à croire que l'activation des neurones de la région l'est aussi. En fait, il ne s'agit pas

d'une baisse d'activation, mais d'une réduction de l'apport sanguin disponible dans cette aire spécifique. Dans le cas de la SPIRf, il serait donc contre-indiqué de comparer les paires directement, puisqu'il est impossible de connaître exactement la nature de la composition cérébrale en dessous de chacune. Ceci explique donc pourquoi seules des comparaisons entre conditions ont été effectuées.

5.4.3. Limites statistiques

Afin d'éviter les erreurs de type I (rejeter l'hypothèse nulle quand elle devrait être acceptée) lors de la compilation des statistiques, il faut habituellement apporter une correction lorsque des comparaisons multiples rendent plus difficile de tirer des conclusions. Toutefois, il se peut que ces tests deviennent trop sévères lorsque le nombre de comparaisons est élevé. Étant donné le grand nombre de comparaisons à faire entre les diverses conditions, et afin d'être homogène dans toutes les analyses, la méthode *Least Significant Difference* (LSD) a été employée. Elle peut être employée lorsque le F omnibus est significatif, et calcule la plus petite différence entre deux moyennes, comme si seules ces deux moyennes devaient être comparées. Elle déclare significatif tout écart supérieur à cet écart minimal (LSD). Cette méthode ne contrôle que très peu, ou pas du tout, les comparaisons multiples. La méthode de correction Bonferroni aurait probablement été plus appropriée en ce qui a trait aux analyses comportementales. Dans les recherches à venir, l'approche *False Discovery Rate* (FDR) pourrait être utilisée afin de minimiser les erreurs de type I dues aux comparaisons multiples. L'approche FDR est une autre façon d'examiner les comparaisons multiples et la proportion attendue d'hypothèses nulles d'être incorrectement rejetées (i.e., faux positifs). Les procédures de contrôle de l'approche FDR sont moins contraignantes quant aux faux positifs que les *Familywise Error Rate* (FWER), dont fait partie la correction Bonferroni. Celles-ci augmentent la puissance en accroissant toutefois le taux d'erreurs de type I.

5.5 Recherches futures

Du côté clinique, on note que la priorisation des tâches aide la performance des aînés, alors que le fait d'établir eux-mêmes la priorité diminue l'exactitude et la vitesse de réponse.

Ces résultats ont toutefois été établis à l'aide de deux tâches visuelles, et il serait intéressant de voir si l'effet de priorisation est le même sur des tâches de deux modalités différentes, et si le fait de donner une priorité égale aurait un impact comportemental et cérébral aussi significatif que lorsque les tâches sont dans la même modalité. De plus, afin de maintenir, voire d'améliorer les habiletés en attention divisée dans la vie quotidienne des aînés, les recherches futures devraient étudier l'impact d'un entraînement en DT avec tâches simultanées, en plus d'évaluer la possibilité de compenser lorsque les tâches sont plus exigeantes chez les aînés, et de mesurer la plasticité induite à l'aide d'une technique d'imagerie. Étant donné les résultats présentés ici, cet outil pourrait certainement être la SPIRF.

En ce qui a trait à l'inhibition et l'alternance, il serait intéressant de les comparer directement à l'aide d'un autre paradigme, tel qu'une tâche de Flanker. Ainsi, en créant un paradigme où l'on comparerait la tâche d'inhibition à une alternance entre tâches cohérente et incohérente, il serait possible de déterminer si les résultats de l'étude 1 sont reproductibles avec d'autres conditions d'inhibition.

Autant au niveau de l'inhibition et de l'alternance que de la double-tâche, il serait aussi possible de comparer au niveau comportemental les plus et les moins performants parmi les aînés et les jeunes, afin de déterminer si des processus cérébraux se maintiennent lorsque les aînés sont plus performants.

Au niveau de la plasticité cérébrale, des études longitudinales pourraient être entreprises afin de vérifier l'évolution des mécanismes du contrôle attentionnel chez la même personne sur une longue période de temps. La plasticité cognitive a souvent été rapportée, mais on connaît mal les mécanismes neuronaux qui la supportent, tout comme leur potentiel de modification avec l'âge. Étant donné les faibles coûts et la facilité de mesure de l'imagerie optique, il serait plus facile de suivre une cohorte sur de nombreuses années qu'avec l'utilisation de l'IRMf, par exemple.

CONCLUSION

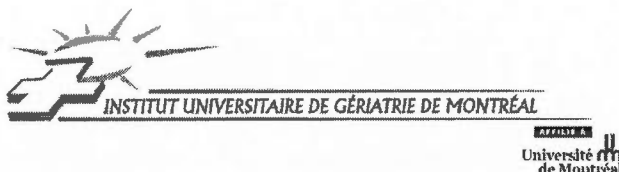
Les résultats obtenus dans cette thèse révèlent une dissociation des patrons d'activation préfrontale différents pour les mécanismes d'inhibition, d'alternance et d'attention divisée. Ils ont d'abord aidé à déterminer qu'il était possible de mesurer de façon précise les patrons d'activation des mécanismes de contrôle attentionnel distincts et ce, tant chez les jeunes adultes que chez les personnes âgées avec la SPIRF. Les résultats appuient aussi les modèles mécanistiques de la cognition, impliquant l'existence de mécanismes distincts de contrôle attentionnel liés à des régions cérébrales distinctes. De plus, ces mécanismes impliqueraient les régions frontales de façon plus étendue chez les personnes âgées que chez les jeunes. Ces résultats ont été démontrés tant au niveau de l'inhibition et de l'alternance (première étude), que de l'attention divisée (deuxième étude).

En lien avec les théories et modèles du vieillissement cérébral normal, les résultats de cette thèse soutiennent l'hypothèse du Scaffolding Theory of Aging and Cognition (STAC ; Park & Reuter-Lorenz, 2009). Ce modèle pose l'hypothèse que les aînés réussissent à maintenir un haut niveau de fonctionnement étant donné l'engagement continu d'un échafaudage compensatoire, soit le recrutement de circuits additionnels qui soutiennent les structures en déclin, dont le fonctionnement est devenu bruité, inefficace ou les deux. Des études futures basées sur les présents résultats et les modèles théoriques pourront déterminer comment modifier ou améliorer la structure de cet échafaudage, et ainsi minimiser l'impact du vieillissement sur le contrôle attentionnel.

ANNEXES

ANNEXE 1

FORMULAIRES DE CONSENTEMENT



**FORMULAIRE DE CONSENTEMENT
À VOTRE PARTICIPATION À UN PROJET DE RECHERCHE
(Imagerie Optique infra-rouge cérébrale, Unité de Neuroimagerie
Fonctionnelle de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal)**

TITRE DU PROJET DE RECHERCHE

Les corrélats neurophysiologiques du contrôle attentionnel dans la tâche de Stroop à l'aide de l'imagerie optique chez les jeunes et les aînés.

RESPONSABLE DU PROJET DE RECHERCHE

Dr Louis Bherer, professeur en psychologie à l'Université du Québec à Montréal et chercheur à l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal.

ORGANISME SUBVENTIONNAIRE

Ce projet est subventionné par le CRSNG et le FRSQ (chercheur boursier).

PRÉAMBULE

On vous demande de participer à un projet de recherche en neuroimagerie. Cependant, avant d'accepter de participer à ce projet de recherche, vous prendrez le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent.

Ce formulaire de consentement vous explique le but de cette étude, les procédures, les avantages, les risques et inconvénients, de même que les personnes avec qui communiquer au besoin.

Le présent formulaire de consentement peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Vous êtes invité(e) à poser toutes les questions que vous jugerez utiles au chercheur et aux autres membres du personnel affecté au projet de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui n'est pas clair.

QU'EST-CE QUE L'IMAGERIE OPTIQUE INFRA-ROUGE?

L'imagerie optique infra-rouge est une technique médicale qui donne des images de grande qualité du fonctionnement du cerveau. Cette technique fait appel à la propagation de la lumière à travers les tissus humains. Par exemple, lorsque l'on illumine la main avec une lampe de poche, une partie de la lumière passe à travers la main.

C'est le principe de base utilisé en imagerie optique : des lasers sont utilisés afin de générer de la lumière infra-rouge. Cette lumière est ensuite dirigée vers les tissus en utilisant des fibres optiques. La lumière se propage dans le cerveau et est en partie absorbée par le sang. Ainsi, en mesurant l'intensité de lumière absorbée, la quantité de sang présent lors d'une tâche peut être mesurée. L'énergie dégagée par la lumière infra-rouge est très faible et ne présente pas de danger.

L'appareil permet de voir les zones du cerveau qui deviennent actives lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche précise. Cette tâche peut être motrice, par exemple, lorsque l'on demande à la personne de bouger un doigt ou bien elle peut être cognitive, par exemple lorsque l'on demande à la personne d'effectuer un calcul mental, lire un mot ou encore regarder des photographies. Lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche, il y a augmentation de l'arrivée de sang dans la partie du cerveau qui contrôle cette activité. L'arrivée du sang provoque un changement dans le signal émis par le cerveau et cette modification de signal peut être détectée par l'appareil d'imagerie optique.

PRÉSENTATION DU PROJET DE RECHERCHE ET DE SES OBJECTIFS

Vous êtes invité(e) à participer à un projet de recherche en neuroimagerie qui vise à identifier et à comprendre les différences entre jeunes et aînés quant à leur attention.

Quinze (15) jeunes adultes et 15 personnes âgées seront recrutés pour réaliser cette étude.

NATURE ET DURÉE DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Ce projet de recherche se déroulera à l'Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal.

La participation à cette expérience implique 2 séances comprenant des pauses pour éviter une fatigue excessive. Lors de la première séance, vous répondrez à un bref questionnaire afin de fournir certaines informations sur votre vision, votre audition et votre santé physique et mentale, suivi d'autres tests neuropsychologiques qui vous seront administrés, ce qui permettra aussi aux chercheurs d'évaluer votre fonctionnement intellectuel général et certaines habilités cognitives comme votre vitesse d'exécution et votre mémoire. Votre participation à ce projet de recherche inclut aussi un examen d'imagerie optique tel que décrit précédemment. Pour cet examen, vous effectuerez 2 tâches informatisées simples qui permettront aux chercheurs de capter les images de votre cerveau pendant que vous effectuez ces tâches. La durée de la première séance sera d'environ 90 à 120 minutes et d'environ 120 minutes lors de l'examen en imagerie optique. La durée totale de votre participation à ce projet de recherche sera d'environ 4 heures. Les 2 séances, à raison d'une seule séance par jour, seront accomplies dans un délai d'une semaine.

- Description des tâches

La tâche consiste à lire et identifier à l'aide du clavier le plus rapidement et correctement possible des mots et/ou des couleurs.

Pour l'examen d'imagerie optique, vous serez assis sur une chaise ayant un support pour la tête. Les fibres optiques sont attachées à un casque qui est fixé à la tête, chacune des fibres sera positionnée individuellement afin d'avoir un contact avec le tissu. Pendant que l'appareil fonctionne, il est important que vous demeuriez immobile. Pour ce faire, un coussinet sera placé autour de votre tête et vous devrez appuyer votre menton sur une mentonnière afin d'assurer votre immobilité. Aucune substance ne vous sera injectée.

AVANTAGES POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Il n'y a aucun avantage direct pouvant découler de votre participation au projet de recherche. Cependant, les connaissances acquises contribueront à l'avancement des connaissances scientifiques en permettant d'étudier les effets bénéfiques de la stimulation intellectuelle sur la vitalité cognitive des aînés.

INCONVÉNIENTS POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Les conditions imposées par l'utilisation de l'imagerie optique peuvent entraîner un certain inconfort du fait de devoir rester immobile pendant l'examen et un inconfort pourrait également être associé au positionnement des fibres sur la tête. De plus, votre participation peut impliquer une perte de temps liée à vos déplacements et au nombre de séances prévues par la recherche. Vous comprenez également qu'il est possible que vous ressentiez un certain état de frustration, de stress et/ou de fatigue au cours de votre participation.

RISQUES POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Selon les connaissances actuelles, votre participation à un examen d'imagerie optique ne vous fera courir, sur le plan médical, aucun risque si vous ne présentez aucune contre-indication.

La vérification rigoureuse de la présence de contre-indications sera assumée par le technologue en fonction à l'Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle.

INDEMNISATION EN CAS DE PRÉJUDICE

Si, dans le cadre de votre participation à l'étude, vous deviez subir quelque préjudice que ce soit, vous recevrez tous les soins médicaux nécessaires, sans frais de votre part.

COMPENSATION FINANCIÈRE

Une somme totale de 40 dollars vous sera remise à titre de compensation pour vos déplacements lors de votre participation à ce projet. Vous devrez toutefois signer un document attestant que cet argent vous a été remis.

INFORMATION CONCERNANT LE PROJET DE RECHERCHE

On répondra, à votre satisfaction, à toute question que vous poserez à propos du projet de recherche auquel vous acceptez de participer.

REFUS OU RETRAIT DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Il est entendu que votre participation au projet de recherche est tout à fait volontaire, et que vous restez à tout moment libre de mettre fin à celle-ci sans avoir ni à motiver votre décision ni à subir de préjudice de quelque nature que ce soit. Le retrait de votre participation n'affectera d'aucune

façon les services, les soins ou les traitements actuels ou ultérieurs qui vous sont offerts.

En cas de retrait, les informations et les images qui vous concernent pourront être détruites à votre demande.

ARRÊT DU PROJET DE RECHERCHE PAR LE CHERCHEUR

Le projet de recherche peut être interrompu par le chercheur pour différents motifs ou certaines circonstances, par exemple, des contre-indications d'ordre éthique ultérieures, l'établissement de nouveaux critères de sélection auxquels vous ne répondrez plus, comme, par exemple, des problèmes de santé pouvant affecter votre performance.

RETOUR D'INFORMATION ET AUTORISATION DE TRANSMETTRE LES RÉSULTATS

Les tests effectués lors de cette recherche ne font pas l'objet d'un examen clinique. Il est toutefois possible que l'examen d'imagerie optique et les tests cognitifs mettent en évidence des problèmes jusque-là ignorés. Le cas échéant, nous pourrions en informer votre médecin traitant qui pourra procéder au suivi médical.

Vous autorisez la personne responsable de ce projet de recherche à transmettre les résultats de votre évaluation à votre médecin traitant si l'examen révèle une condition nécessitant un suivi:

Oui Non

Nom et adresse du médecin traitant :

CONFIDENTIALITÉ

Il est entendu que les observations effectuées en ce qui vous concerne, dans le cadre du projet de recherche décrit ci-dessus, demeureront strictement confidentielles. Votre dossier sera codé de façon à ce qu'il demeure confidentiel et gardé dans une filière sous clé, où seuls les responsables du projet y auront accès. Les données seront conservées pendant 5 ans et détruites ou anonymisées à la fin de ce délai. De plus, les données nominales (nom, adresse ou toute autre indication) seront conservées dans un fichier à part. En cas de présentation des résultats de cette recherche ou de publication dans des revues spécialisées, rien ne pourra permettre de vous identifier ou de vous retracer.

Une exception sera faite dans les cas où les données de recherche devraient être révisées par un comité de déontologie, le comité d'éthique de la recherche ou par les organismes qui subventionnent cette recherche. Les membres de ces comités sont tenus de respecter les exigences de confidentialité. En outre, un tribunal peut, par ordonnance, autoriser un tiers à consulter les données de recherche vous concernant.

Les images d'imagerie optique seront conservées et archivées dans une banque de données pour une période de dix ans après la fin de ce projet de recherche et pourraient être utilisées dans d'autres études.

DROITS LÉGAUX

En signant le présent formulaire, vous ne renoncerez à aucun de vos droits légaux ni ne libérez le chercheur et l'établissement où se déroule cette étude de leur responsabilité civile et professionnelle.

CONSENTEMENT DU PARTICIPANT

Je déclare avoir lu le présent formulaire de consentement, particulièrement quant à la nature de ma participation au projet de recherche et l'étendue des risques qui en découlent. Je reconnais qu'on m'a expliqué le projet, qu'on a répondu à toutes mes questions et qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre une décision.

Je consens librement et volontairement à participer à ce projet. On me remettra une copie signée du présent formulaire.

Nom du sujet (lettres moulées)

Signature du sujet

Fait à _____, le _____.

DÉCLARATION DU CHERCHEUR

Je, soussigné(e) _____, certifie :

Avoir expliqué au signataire intéressé les termes du présent formulaire, avoir répondu aux questions qu'il m'a posées à cet égard, avoir clairement indiqué qu'il reste à tout moment libre de mettre un terme à sa participation au projet de recherche décrit ci-dessus. Je lui remettrai une copie signée du présent formulaire de consentement.

Nom du chercheur ou de son
représentant (lettres moulées)

Signature du chercheur ou de
son représentant

Fait à _____, le _____.

ACCÈS AUX CHERCHEURS

Si vous avez des questions concernant le projet de recherche ou si vous croyez que vous éprouvez un problème de santé relié à votre participation au projet de recherche ou si vous avez des questions sur les soins médicaux qui vous sont offerts dans le cadre de ce projet de recherche, vous pouvez communiquer avec le chercheur responsable de l'étude.

Le responsable du projet, Dr Louis Bherer, chercheur et professeur, peut être rejoint aux deux endroits suivants :

Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal

4565, chemin Queen Mary, Montréal, Québec, H3W 1W5.
Tél. : (514) 340-3540. Fax : (514) 340-3548.

Département de psychologie
Université du Québec à Montréal
Case postale 8888, succursale Centre-Ville
Montréal, Québec, H3C 3P8
Tél. : (514) 987-3000 poste 1944

PROCÉDURES EN CAS D'URGENCE MÉDICALE

Veillez noter que l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal n'est pas un centre hospitalier de soins de courte durée qui offre des services d'urgence et qui compte sur la présence sur place d'un médecin 24 heures sur 24. Par conséquent, advenant une condition médicale qui nécessiterait des soins immédiats, les premiers soins vous seraient dispensés par le personnel en place et des dispositions seraient prises afin de vous transférer, si nécessaire, aux urgences d'un hôpital avoisinant.

EN CAS DE PLAINTE

Pour tout problème concernant les conditions dans lesquelles se déroule votre participation à ce projet, vous pouvez, après en avoir discuté avec la personne responsable du projet, faire part de vos préoccupations à la responsable des plaintes de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal à l'adresse suivante : Madame Denyse Marier, Commissaire locale à la qualité des services, Institut universitaire de gériatrie de Montréal, 4565, chemin Queen-Mary, Montréal (Québec) H3W 1W5. Tél. : (514) 340-3517. Courriel : denyse.marier.iugm@ssss.gouv.qc.ca

INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE ÉTHIQUE

Le comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie/Québec a approuvé ce projet de recherche et s'assure du respect des règles éthiques durant tout le déroulement de la recherche. Pour toute information, vous pouvez rejoindre le secrétariat du Comité au numéro : (514) 340-2800, poste 3250.



**FORMULAIRE DE CONSENTEMENT
À VOTRE PARTICIPATION À UN PROJET DE RECHERCHE
(Imagerie Optique infra-rouge cérébrale, Unité de Neuroimagerie
Fonctionnelle de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal)**

TITRE DU PROJET DE RECHERCHE

Les corrélats neurophysiologiques de l'effet de priorité en situation de double-tâche chez les jeunes et les aînés.

RESPONSABLE DU PROJET DE RECHERCHE

Dr Louis Bherer, professeur en psychologie à l'Université du Québec à Montréal et chercheur à l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal.

ORGANISME SUBVENTIONNAIRE

Ce projet est subventionné par le CRSNG et le FRSQ (chercheur boursier).

PRÉAMBULE

On vous demande de participer à un projet de recherche en neuroimagerie. Cependant, avant d'accepter de participer à ce projet de recherche, vous prendrez le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent.

Ce formulaire de consentement vous explique le but de cette étude, les procédures, les avantages, les risques et inconvénients, de même que les personnes avec qui communiquer au besoin.

Le présent formulaire de consentement peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Vous êtes invité(e) à poser toutes les questions que vous jugerez utiles au chercheur et aux autres membres du personnel affecté au projet de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui n'est pas clair.

QU'EST-CE QUE L'IMAGERIE OPTIQUE INFRA-ROUGE?

L'imagerie optique infra-rouge est une technique médicale qui donne des images de grande qualité du fonctionnement du cerveau. Cette technique fait appel à la propagation de la lumière à travers les tissus humains. Par exemple, lorsque l'on illumine la main avec une lampe de poche, une partie de la lumière passe à travers la main.

C'est le principe de base utilisé en imagerie optique : des lasers sont utilisés afin de générer de la lumière infra-rouge. Cette lumière est ensuite dirigée vers les tissus en utilisant des fibres optiques. La lumière se propage dans le cerveau et est en partie absorbée par le sang. Ainsi, en mesurant l'intensité de lumière absorbée, la quantité de sang présent lors d'une tâche peut être mesurée. L'énergie dégagée par la lumière infra-rouge est très faible et ne présente pas de danger.

L'appareil permet de voir les zones du cerveau qui deviennent actives lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche précise. Cette tâche peut être motrice, par exemple, lorsque l'on demande à la personne de bouger un doigt ou bien elle peut être cognitive, par exemple lorsque l'on demande à la personne d'effectuer un calcul mental, lire un mot ou encore regarder des photographies. Lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche, il y a augmentation de l'arrivée de sang dans la partie du cerveau qui contrôle cette activité. L'arrivée du sang provoque un changement dans le signal émis par le cerveau et cette modification de signal peut être détectée par l'appareil d'imagerie optique.

PRÉSENTATION DU PROJET DE RECHERCHE ET DE SES OBJECTIFS

Vous êtes invité(e) à participer à un projet de recherche en neuroimagerie qui vise à identifier et à comprendre les différences entre jeunes et aînés quant à leur attention.

Seize (16) jeunes adultes et 16 personnes âgées seront recrutés pour réaliser cette étude.

NATURE ET DURÉE DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Ce projet de recherche se déroulera à l'Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal.

La participation à cette expérience implique 2 séances comprenant des pauses pour éviter une fatigue excessive. Lors de la première séance, vous répondrez à un bref questionnaire afin de fournir certaines informations sur votre vision, votre audition et votre santé physique et mentale, suivi d'autres tests neuropsychologiques qui vous seront administrés, ce qui permettra aussi aux chercheurs d'évaluer votre fonctionnement intellectuel général et certaines habilités cognitives comme votre vitesse d'exécution et votre mémoire. Votre participation à ce projet de recherche inclut aussi un examen d'imagerie optique tel que décrit précédemment. Pour cet examen, vous effectuerez 2 tâches informatisées simples qui permettront aux chercheurs de capter les images de votre cerveau pendant que vous effectuez ces tâches. La durée de la première séance sera d'environ 90 à 120 minutes et d'environ 120 minutes lors de l'examen en imagerie optique. La durée totale de votre participation à ce projet de recherche sera d'environ 4 heures. Les 2 séances, à raison d'une seule séance par jour, seront accomplies dans un délai de 5 jours.

- Description des tâches

La tâche consiste à lire et identifier à l'aide du clavier le plus rapidement et correctement possible des lettres et/ou des couleurs.

Pour l'examen d'imagerie optique, vous serez assis sur une chaise ayant un support pour la tête. Les fibres optiques sont attachées à un casque qui est fixé à la tête, chacune des fibres sera positionnée individuellement afin d'avoir un contact avec le tissu. Pendant que l'appareil fonctionne, il est important que vous demeuriez immobile. Pour ce faire, vous devrez appuyer votre menton sur une mentonnière afin d'assurer votre immobilité. Aucune substance ne vous sera injectée.

AVANTAGES POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Il n'y a aucun avantage direct pouvant découler de votre participation au projet de recherche. Cependant, les connaissances acquises contribueront à l'avancement des connaissances scientifiques en permettant d'étudier les effets bénéfiques de la stimulation intellectuelle sur la vitalité cognitive des aînés.

INCONVÉNIENTS POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Les conditions imposées par l'utilisation de l'imagerie optique peuvent entraîner un certain inconfort du fait de devoir rester immobile pendant l'examen et un inconfort pourrait également être associé au positionnement des fibres sur la tête. De plus, votre participation peut impliquer une perte de temps liée à vos déplacements et au nombre de séances prévues par la recherche. Vous comprenez également qu'il est possible que vous ressentiez un certain état de frustration, de stress et/ou de fatigue au cours de votre participation.

RISQUES POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Selon les connaissances actuelles, votre participation à un examen d'imagerie optique ne vous fera courir, sur le plan médical, aucun risque si vous ne présentez aucune contre-indication.

La vérification rigoureuse de la présence de contre-indications sera assumée par le technologue en fonction à l'Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle.

INDEMNISATION EN CAS DE PRÉJUDICE

Si, dans le cadre de votre participation à l'étude, vous deviez subir quelque préjudice que ce soit, vous recevrez tous les soins médicaux nécessaires, sans frais de votre part.

COMPENSATION FINANCIÈRE

Une somme totale de 40 dollars vous sera remise à titre de compensation pour vos déplacements lors de votre participation à ce projet. Vous devrez toutefois signer un document attestant que cet argent vous a été remis.

INFORMATION CONCERNANT LE PROJET DE RECHERCHE

On répondra, à votre satisfaction, à toute question que vous poserez à propos du projet de recherche auquel vous acceptez de participer.

REFUS OU RETRAIT DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Il est entendu que votre participation au projet de recherche est tout à fait volontaire, et que vous restez à tout moment libre de mettre fin à celle-ci sans avoir ni à motiver votre décision ni à subir de préjudice de quelque

nature que ce soit. Le retrait de votre participation n'affectera d'aucune façon les services, les soins ou les traitements actuels ou ultérieurs qui vous sont offerts.

En cas de retrait, les informations et les images qui vous concernent pourront être détruites à votre demande.

ARRÊT DU PROJET DE RECHERCHE PAR LE CHERCHEUR

Le projet de recherche peut être interrompu par le chercheur pour différents motifs ou certaines circonstances, par exemple, des contre-indications d'ordre éthique ultérieures, l'établissement de nouveaux critères de sélection auxquels vous ne répondrez plus, comme, par exemple, des problèmes de santé pouvant affecter votre performance.

RETOUR D'INFORMATION ET AUTORISATION DE TRANSMETTRE LES RÉSULTATS

Les tests effectués lors de cette recherche ne font pas l'objet d'un examen clinique. Il est toutefois possible que l'examen d'imagerie optique et les tests cognitifs mettent en évidence des problèmes jusque-là ignorés. Le cas échéant, nous pourrions en informer votre médecin traitant qui pourra procéder au suivi médical.

Vous autorisez la personne responsable de ce projet de recherche à transmettre les résultats de votre évaluation à votre médecin traitant si l'examen révèle une condition nécessitant un suivi:

Oui Non

Nom et adresse du médecin traitant :

CONFIDENTIALITÉ

Il est entendu que les observations effectuées en ce qui vous concerne, dans le cadre du projet de recherche décrit ci-dessus, demeureront

strictement confidentielles. Votre dossier sera codé de façon à ce qu'il demeure confidentiel et gardé dans une filière sous clé, où seuls les responsables du projet y auront accès. Les données seront conservées pendant 5 ans et détruites ou anonymisées à la fin de ce délai. De plus, les données nominales (nom, adresse ou toute autre indication) seront conservées dans un fichier à part. En cas de présentation des résultats de cette recherche ou de publication dans des revues spécialisées, rien ne pourra permettre de vous identifier ou de vous retracer.

Une exception sera faite dans les cas où les données de recherche devraient être révisées par un comité de déontologie, le comité d'éthique de la recherche ou par les organismes qui subventionnent cette recherche. Les membres de ces comités sont tenus de respecter les exigences de confidentialité. En outre, un tribunal peut, par ordonnance, autoriser un tiers à consulter les données de recherche vous concernant.

Les images d'imagerie optique seront conservées et archivées dans une banque de données pour une période de dix ans après la fin de ce projet de recherche et pourraient être utilisées dans d'autres études.

DROITS LÉGAUX

En signant le présent formulaire, vous ne renoncerez à aucun de vos droits légaux ni ne libérez le chercheur et l'établissement où se déroule cette étude de leur responsabilité civile et professionnelle.

CONSENTEMENT DU PARTICIPANT

Je déclare avoir lu le présent formulaire de consentement, particulièrement quant à la nature de ma participation au projet de recherche et l'étendue des risques qui en découlent. Je reconnais qu'on m'a expliqué le projet, qu'on a répondu à toutes mes questions et qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre une décision.

Je consens librement et volontairement à participer à ce projet. On me remettra une copie signée du présent formulaire.

Nom du sujet (lettres moulées)

Signature du sujet

Fait à _____, le _____.

DÉCLARATION DU CHERCHEUR

Je, soussigné(e) _____,
certifie :

Avoir expliqué au signataire intéressé les termes du présent formulaire, avoir répondu aux questions qu'il m'a posées à cet égard, avoir clairement indiqué qu'il reste à tout moment libre de mettre un terme à sa participation au projet de recherche décrit ci-dessus. Je lui remettrai une copie signée du présent formulaire de consentement.

Nom du chercheur ou de son
représentant (lettres moulées)

Signature du chercheur ou de
son représentant

Fait à _____, le _____.

ACCÈS AUX CHERCHEURS

Si vous avez des questions concernant le projet de recherche ou si vous croyez que vous éprouvez un problème de santé relié à votre participation au projet de recherche ou si vous avez des questions sur les soins médicaux qui vous sont offerts dans le cadre de ce projet de recherche, vous pouvez communiquer avec le chercheur responsable de l'étude. Le responsable du projet, Dr Louis Bherer, chercheur et professeur, peut être rejoint aux deux endroits suivants :

Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal

4565, chemin Queen Mary, Montréal, Québec, H3W 1W5.

Tél. : (514) 340-3540. Fax : (514) 340-3548.

Département de psychologie

Université du Québec à Montréal

Case postale 8888, succursale Centre-Ville

Montréal, Québec, H3C 3P8

Tél. : (514) 987-3000 poste 1944

PROCÉDURES EN CAS D'URGENCE MÉDICALE

Veillez noter que l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal n'est pas un centre hospitalier de soins de courte durée qui offre des services d'urgence et qui compte sur la présence sur place d'un médecin 24 heures sur 24. Par conséquent, advenant une condition médicale qui nécessiterait des soins immédiats, les premiers soins vous seraient dispensés par le personnel en place et des dispositions seraient prises afin de vous transférer, si nécessaire, aux urgences d'un hôpital avoisinant.

EN CAS DE PLAINTES

Pour tout problème concernant les conditions dans lesquelles se déroule votre participation à ce projet, vous pouvez, après en avoir discuté avec la personne responsable du projet, faire part de vos préoccupations à la

responsable des plaintes de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal à l'adresse suivante : Madame Denyse Marier, Commissaire locale à la qualité des services, Institut universitaire de gériatrie de Montréal, 4565, chemin Queen-Mary, Montréal (Québec) H3W 1W5. Tél. : (514) 340-3517. Courriel : denyse.marier.iugm@ssss.gouv.qc.ca

INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE ÉTHIQUE

Le comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie/Québec a approuvé ce projet de recherche et s'assure du respect des règles éthiques durant tout le déroulement de la recherche. Pour toute information, vous pouvez rejoindre le secrétariat du Comité au numéro : (514) 340-2800, poste 3250.

ANNEXE 2

APPROBATION SCIENTIFIQUE ET ÉTHIQUE

R egroupement N euroimagerie / Q uébec

Comité conjoint d'évaluation scientifique CÉS-RNQ)

Statut RNQ :	Membre RNQ signataire
Tarif horaire	400\$/hre (avant 17h)
UNF :	600\$/hre (après 17h)
Tarif	Établissement signataire
CMER-RNQ :	

Le 15 mai 2006

Louis Bherer
CRIUGM
4565, chemin Queen Mary
Montréal (Qc) H3W 1W5

Objet : Rapport du comité conjoint d'évaluation scientifique du Regroupement de Neuroimagerie/Québec

Cher Dr Bherer,

J'ai le plaisir de vous annoncer que lors de la rencontre qui eut lieu le dernier, les membres du CÉS-RNQ ont accepté sans réserve votre projet de recherche no 06-07 004 intitulé *Les corrélats neurophysiologiques du contrôle attentionnel dans la tâche de Stroop à l'aide de l'imagerie optique chez les jeunes et les aînés.*

Par conséquent votre projet sera acheminé au comité conjoint d'éthique de la recherche du RNQ, lequel est présidé par Mme Johane De Champlain.

Suite à l'acceptation finale de votre projet par le CÉR, nous vous invitons à visiter notre site Internet à l'adresse suivante : www.unf-montreal.ca afin de réserver les plages horaires nécessaires à l'acquisition de vos données IRM à l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle de l'IUGM.

Espérant le tout conforme, veuillez agréer, l'expression de mes sentiments distingués.



Julien Doyon, Ph.D.

Président, comité conjoint d'évaluation scientifique du RNQ
Institut universitaire de gériatrie de Montréal

c.c. Mme Johane De Champlain, Présidente du CER-RNQ.

Regroupement **N**euroimagerie / **Q**uébec
Comité mixte d'éthique de la recherche - RNQ

Montréal, le 9 août 2007

Monsieur Louis Bherer, Ph.D.
Centre de recherche
Institut universitaire de gériatrie de Montréal
4565, chemin Queen-Mary
Montréal, Québec H3W 1W5

OBJET : Votre projet de recherche intitulé : «Les corrélats neurophysiologiques de l'effet de priorité en situation de double-tâche chez les jeunes et les aînés» (réf. : CMER-RNQ 07-08-001).

Monsieur,

Les membres du comité d'éthique vous remercient de leur avoir fait parvenir votre formulaire de consentement modifié selon les modifications qu'ils avaient demandées.

Vous trouverez ci-joint le rapport de l'établissement valide jusqu'au 30 septembre 2008. Un suivi annuel, sous forme de questionnaire, vous sera envoyé avant l'expiration de ce délai, et la réalisation de cette démarche vous permettra de renouveler le rapport tout au long de votre étude.

Nous vous rappelons que vous devez nous avertir de toute modification au projet de recherche ou au formulaire de consentement.

Par ailleurs, conformément aux directives du Ministère de la Santé et des Services sociaux et tel qu'inscrit au Cadre réglementaire de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal, vous devez constituer un registre des sujets participant à votre projet de recherche. Ce registre comportera les éléments suivants : le titre du projet de recherche, le nom et le prénom du sujet, sa date de naissance et ses coordonnées. Il est à noter que ces informations seront tenues confidentielles dans un registre à part, avec un niveau de sécurité adéquat.

Nous vous remercions de votre collaboration et vous souhaitons la meilleure des chances dans ce projet. Veuillez recevoir, Monsieur, l'expression de nos sentiments les meilleurs.



Johane de Champlain
Présidente
Comité mixte d'éthique de la recherche - RNQ

JdC/gs

Comité mixte d'éthique de la recherche - Regroupement Neuroimagerie/Québec (CMER-RNQ)
4565, chemin Queen Mary, Montréal (Québec) H3W 1W5
Téléphone : (514) 340-2800 poste 3250
Courriel : comite.d.ethique.recherche.iugm@sss.gouv.qc.ca

ANNEXE 3

PREUVE DE SOUMISSION DE L'ARTICLE 2



Maude Laguë-Beauvais <maude.lb@gmail.com>

Brain and Cognition: Submission Confirmation

1 message

B-C (ELS) <b-c@elsevier.com>
To: maude.lb@gmail.com

Thu, Jun 27, 2013 at 12:19 PM

Title: Shedding light on the effect of priority instructions during dual-task performance in younger and older adults: A fNIRS study.

Corresponding Author: Ms. Maude Laguë-Beauvais
Authors: Sarah A Fraser; Laurence Desjardins-Crépeau; Nathalie Castonguay; Michèle Desjardins; Frédéric Lesage; Louis Bherer

Dear Ms. Laguë-Beauvais,

This is to confirm that the above-mentioned manuscript has been received for consideration in Brain and Cognition. You will be able to check on the progress of your manuscript by logging on to the Elsevier Editorial System for Brain and Cognition as an author: <http://ees.elsevier.com/brcg/>

Your username is: maude.lb@gmail.com If you need to retrieve password details, please go to: [http://ees.elsevier.com/\[EESACRONYM\]/automail_query.asp](http://ees.elsevier.com/[EESACRONYM]/automail_query.asp).

Your paper will be given a manuscript number shortly and you will soon receive an e-mail with this number for your reference. For guidelines on how to track your manuscript in EES please go the following address: http://help.elsevier.com/app/answers/detail/p/7923/a_id/89

Thank you for submitting your manuscript to Brain and Cognition. Should you have any questions, please feel free to contact our office.

Kind regards,

Brain and Cognition

For further assistance, please visit our customer support site at <http://help.elsevier.com/app/answers/list/p/7923> Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions and learn more about EES via interactive tutorials. You will also find our 24/7 support contact details should you need any further assistance from one of our customer support representatives.

ANNEXE 4

DEMANDE DE PUBLICATION DANS LE JOURNAL OF VISUALIZED
EXPERIMENTS (JOVE)

De : Jane Hannon <jane.hannon@jove.com>

Date : lundi 3 décembre 2012 15:24

À : Louis Bherer <bherer.louis@uqam.ca>

Objet : Opportunity to Publish with JoVE (Journal of Visualized Experiments)

Dear Dr. Bherer,

My name is Jane Hannon and I am an Associate Editor at the Journal of Visualized Experiments (JoVE). I recently came across your article, "A fNIRS investigation of switching and inhibition during the modified Stroop task in younger and older adults." I am interested in speaking with you about publishing a video article on the methods you used. Would you be available for a brief phone conversation?

JoVE is the only peer-reviewed, PubMed-indexed video methods journal and aims to increase the visibility and reproducibility of research. I encourage you to check out some of our video articles related to your research field:

Quantifying Cognitive Decrements Cause by Cranial Radiotherapy Lori-Ann Christie, Munjal M. Acharya, Charles L. Limoli (2011) University of California Irvine

Coherence between Brain Cortical Function and Neurocognitive Performance during Changed Gravity Conditions Vera Brummer*, Stefan Schneider*, Tobias Vogt*, Heiko Struder*, Heather Carnahan**, Christopher D. Askew***, Roland Csuha**** (2011)

Investigating Social Cognition in Infants and Adults Using Dense Array Electroencephalography (dEEG) Adekemi J. Akano, David W. Haley, Joanna Dudek (2011) University Toronto Scarborough

I look forward to hearing from you soon.

Cheers,
Jane

We are making the biggest change to scientific publishing in 350 years. Come help us do it.

Jane Hannon

Associate Editor *JoVE* (*Journal of Visualized Experiments*)

17 Sellers St., Cambridge, MA 02139

tel. 617.401.7628 x310 (direct) | jane.hannon@jove.com

What is *JoVE*? | [This Month in JoVE](#)

jove

RÉFÉRENCES

- Allen, P. A., Ruthruff, E., Elicker, J. D., & Lien, M. C. (2009). «Multisession, dual-task psychological refractory period practice benefits older and younger adults equally.» *Exp Aging Res*, *35*, 369-399.
- Allen, P. A., Ruthruff, E., & Lien, M.-C. (2007). Attention. In J. E. Birren (Ed.), *Encyclopedia of Gerontology* (2 ed., pp. 120-129). San Diego (CA): Academic Press.
- Allen, P. A., Smith, A. F., Vires-Collins, H., & Sperry, S. (1998). «The psychological refractory period: Evidence for age differences in attentional time-sharing.» *Psychol Aging*, *13*, 218.
- Andres, P., Guerrini, C., Phillips, L. H., & Perfect, T. J. (2008). «Differential effects of aging on executive and automatic inhibition.» *Dev Neuropsychol*, *33*, 101-123.
- Anstey, K. J., & Wood, J. (2011). «Chronological age and age-related cognitive deficits are associated with an increase in multiple types of driving errors in late life.» *Neuropsychology*, *25*, 613.
- Aron, A. R. (2007). «The neural basis of inhibition in cognitive control.» *The Neuroscientist*, *13*, 214-228.
- Aron, A. R. (2008). «Progress in Executive-Function Research From Tasks to Functions to Regions to Networks.» *Current Directions in Psychological Science*, *17*, 124-129.
- Aron, A. R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2004). «Inhibition and the right inferior frontal cortex.» *Trends in cognitive sciences*, *8*, 170-177.
- Badre, D., & Wagner, A. D. (2007). «Left ventrolateral prefrontal cortex and the cognitive control of memory.» *Neuropsychologia*, *45*, 2883-2901.
- Ballesteros, S., Nilsson, L. G., & Lemaire, P. (2009). «Ageing, cognition, and neuroscience: An introduction.» *European Journal of Cognitive Psychology*, *21*, 161-175.
- Bherer, L., Belleville, S., & Hudon, C. (2004). «Le déclin des fonctions exécutives au cours du vieillissement normal, dans la maladie d'Alzheimer et dans la démence frontotemporale.» *Psychol Neuropsychiatr Vieil*, *2*, 181-189.
- Bherer, L., Kramer, A. F., Peterson, M. S., Colcombe, S., Erickson, K., & Becic, E. (2005). «Training effects on dual-task performance: are there age-related differences in plasticity of attentional control?» *Psychol Aging*, *20*, 695-709.

- Bherer, L., Kramer, A. F., Peterson, M. S., Colcombe, S., Erickson, K., & Becic, E. (2008). «Transfer effects in task-set cost and dual-task cost after dual-task training in older and younger adults: further evidence for cognitive plasticity in attentional control in late adulthood.» *Exp Aging Res*, *34*, 188-219.
- Bishop, N. A., Lu, T., & Yankner, B. A. (2010). «Neural mechanisms of ageing and cognitive decline.» *Nature*, *464*, 529-535.
- Boas, D., Dale, A. M., & Franceschini, M. A. (2004). «Diffuse optical imaging of brain activation: approaches to optimizing image sensitivity, resolution and accuracy.» *Neuroimage*, *23*, S275-S288.
- Bohnen, N., Jolles, J., & Twijnstra, A. (1992). «Modification of the stroop color word test improves differentiation between patients with mild head injury and matched controls.» *Clin Neuropsychol*, *6*, 178-184.
- Brass, M., & von Cramon, D. Y. (2002). «The Role of the Frontal Cortex in Task Preparation.» *Cereb. Cortex*, *12*, 908-914.
- Braver, T. S., Reynolds, J. R., & Donaldson, D. I. (2003). «Neural mechanisms of transient and sustained cognitive control during task switching.» *Neuron*, *39*, 713-726.
- Braver, T. S., & West, R. (2008). Working memory, executive control, and aging. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.), *The handbook of aging and cognition* (3 ed., pp. 311-372). New York (NY): Psychology Press, Taylor and Francis Group.
- Buckner, R. L., Snyder, A. Z., Sanders, A. L., Raichle, M. E., & Morris, J. C. (2000). «Functional brain imaging of young, nondemented, and demented older adults.» *J Cogn Neurosci*, *12*, 24-34.
- Bugg, J. M., DeLosh, E. L., Davalos, D. B., & Davis, H. P. (2007). «Age differences in Stroop interference: Contributions of general slowing and task-specific deficits.» *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *14*, 155-167.
- Bunge, S. A., Kahn, I., Wallis, J. D., Miller, E. K., & Wagner, A. D. (2003). «Neural circuits subserving the retrieval and maintenance of abstract rules.» *Journal of Neurophysiology*, *90*, 3419-3428.
- Cabeza, R. (2002). «Hemispheric asymmetry reduction in older adults: The HAROLD model.» *Psychol Aging*, *17*, 85-100.
- Cabeza, R., Anderson, N. D., Locantore, J. K., & McIntosh, A. R. (2002). «Aging gracefully: Compensatory brain activity in high-performing older adults.» *Neuroimage*, *17*, 1394-1402.

- Cappell, K. A., Gmeindl, L., & Reuter-Lorenz, P. A. (2010). «Age differences in prefrontal recruitment during verbal working memory maintenance depend on memory load.» *Cortex*, *46*, 462.
- Carlson, M. C., Xue, Q.-L., Zhou, J., & Fried, L. P. (2009). «Executive decline and dysfunction precedes declines in memory: The Women's Health and Aging Study II.» *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *64*, 110.
- Clapp, W. C., Rubens, M. T., Sabharwal, J., & Gazzaley, A. (2011). «Deficit in switching between functional brain networks underlies the impact of multitasking on working memory in older adults.» *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*, 7212-7217.
- Cerella, J. (1985). «Information processing rates in the elderly.» *Psychological bulletin*, *98*, 67.
- Cohen-Adad, J., Chapuisat, S., Doyon, J., Rossignol, S., Lina, J. M., Benali, H., & Lesage, F. (2007). «Activation detection in diffuse optical imaging by means of the general linear model.» *Med Image Anal*, *11*, 616-629.
- Cope, M., Delpy, D. T., Reynolds, E. O., Wray, S., Wyatt, J., & van der Zee, P. (1988). «Methods of quantitating cerebral near infrared spectroscopy data.» *Adv Exp Med Biol*, *222*, 183-189.
- Craik, F. I. M., & Bialystok, E. (2006). «Cognition through the lifespan: mechanisms of change.» *Trends in cognitive sciences*, *10*, 131-138.
- Davidson, D. J., Zacks, R. T., & Williams, C. C. (2003). «Stroop interference, practice, and aging.» *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *10*, 85-98.
- Davis, S. W., Kragel, J. E., Madden, D. J., & Cabeza, R. (2012). «The architecture of cross-hemispheric communication in the aging brain: linking behavior to functional and structural connectivity.» *Cereb Cortex*, *22*, 232-242.
- Delpy, D. T., & Cope, M. (1997). «Quantification in tissue near-infrared spectroscopy.» *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, *352*, 649-659.
- Dennis, N. A., & Cabeza, R. (2008). Neuroimaging of healthy cognitive aging. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.), *The handbook of aging and cognition* (3 ed., Vol. 3, pp. 1-54). New York (NY): Psychology Press, Taylor and Francis Group.
- Derrfuss, J., Brass, M., Neumann, J., & Von Cramon, D. Y. (2005). «Involvement of the inferior frontal junction in cognitive control: Meta-analyses of switching and Stroop studies.» *Hum Brain Mapp*, *25*, 22-34.

- Devor, A., Tian, P., Nishimura, N., Teng, I.C., Hillman, E.M., Narayanan, S., Ulbert, I., Boas, D.A., Kleinfeld, D., & Dale, A.M., (2007). «Suppressed neuronal activity and concurrent arteriolar vasoconstriction may explain negative blood oxygenation level-dependent signal.» *The Journal of Neuroscience*, 27, 4452-4459.
- DiGirolamo, G. J., Kramer, A. F., Barad, V., Cepeda, N. J., Weissman, D. H., Milham, M. P., Wszalek, T., Cohen, N. J., Banich, M. T., Webb, A., Belopolsky, A. V., & McAuley, E. (2001). «General and task-specific frontal lobe recruitment in older adults during executive processes: A fMRI investigation of task-switching.» *Neuroreport*, 12, 2065-2071.
- Dove, A., Pollmann, S., Schubert, T., Wiggins, C. J., & Yves von Cramon, D. (2000). «Prefrontal cortex activation in task switching: an event-related fMRI study.» *Cognitive Brain Research*, 9, 103-109.
- Drag, L. L., & Bieliauskas, L. A. (2010). «Contemporary review 2009: cognitive aging.» *Journal of geriatric psychiatry and neurology*, 23, 75-93.
- Dreher, J. C., & Grafman, J. (2003). «Dissociating the roles of the rostral anterior cingulate and the lateral prefrontal cortices in performing two tasks simultaneously or successively.» *Cereb Cortex*, 13, 329-339.
- Dreher, J. C., Koechlin, E., Ali, S. O., & Grafman, J. (2002). «The roles of timing and task order during task switching.» *Neuroimage*, 17, 95-109.
- Duncan, A., Meek, J. H., Clemence, M., Elwell, C. E., Fallon, P., Tyszczuk, L., Cope, L., & Delpy, D. T. (1996). «Measurement of cranial optical path length as a function of age using phase resolved near infrared spectroscopy.» *Pediatr Res*, 39, 889-894.
- Ehlis, A. C., Herrmann, M., Wagener, A., & Fallgatter, A. (2005). «Multi-channel near-infrared spectroscopy detects specific inferior-frontal activation during incongruent Stroop trials.» *Biol Psychol*, 69, 315-331.
- Ekkekakis, P. (2009). «Illuminating the black box: Investigating prefrontal cortical hemodynamics during exercise with near-infrared spectroscopy.» *J Sport Exerc Psychol*, 31, 505-553.
- Erickson, K. I., Colcombe, S. J., Wadhwa, R., Bherer, L., Peterson, M. S., Scalf, P. E., Kim, J. S., Alvarado, M., & Kramer, A. F. (2007). «Training-induced functional activation changes in dual-task processing: an FMRI study.» *Cereb Cortex*, 17, 192-204.
- Fabiani, M. (2012). «It was the best of times, it was the worst of times: A psychophysiolgist's view of cognitive aging.» *Psychophysiology*.

- Ferrari, M., & Quaresima, V. (2012). «A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application.» *Neuroimage*, *63*, 921-935.
- Fisk, J. E., & Sharp, C. A. (2004). «Age-related impairment in executive functioning: updating, inhibition, shifting, and access.» *J Clin Exp Neuropsychol*, *26*, 874-890.
- Folstein, M. F., Folstein, S. E., & McHugh, P. R. (1975). *Mini-Mental State: a practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician*: Pergamon Press.
- Folstein, M. F., Robins, L. N., & Helzer, J. E. (1983). «The Mini-Mental State Examination.» *Arch Gen Psychiatry*, *40*, 812.
- Fraser, S. A. & Bherer, L. (under review, Feb 2013). *Age-related decline in divided attention: From theoretical lab research to practical real life situations*. An advanced review of divided attention to be included in Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science, edited by Lynn Nadel.
- Glass, J. M., Schumacher, E. H., Lauber, E. J., Zurbriggen, E. L., Gmeindl, L., Kieras, D. A., & Meyer, D. E. (2000). «Aging and the psychological refractory period: Task-coordination strategies in young and old adults.» *Psychol Aging*, *15*, 571-595.
- Goh, J. O. S. (2011). «Functional dedifferentiation and altered connectivity in older adults: neural accounts of cognitive aging.» *Aging and disease*, *2*, 30.
- Goh, J. O. S., & Park, D. C. (2009). «Neuroplasticity and cognitive aging: The scaffolding theory of aging and cognition.» *Restor Neurol Neurosci*, *27*, 391-403.
- Gold, B. T., Powell, D. K., Xuan, L., Jicha, G. A., & Smith, C. D. (2010). «Age-related slowing of task switching is associated with decreased integrity of frontoparietal white matter.» *Neurobiol Aging*, *31*, 512.
- Grady, C. (2008). «Cognitive neuroscience of aging.» *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1124*, 127-144.
- Grady, C. (2012). «The cognitive neuroscience of ageing.» *Nat Rev Neurosci*, *13*, 491-505.
- Grady, C., Springer, M. V., Hongwanishkul, D., McIntosh, A. R., & Winocur, G. (2006). «Age-related changes in brain activity across the adult lifespan.» *J Cogn Neurosci*, *18*, 227-241.
- Gratton, G., Wee, E., Rykhlevskaia, E. I., Leaver, E. E., & Fabiani, M. (2009). «Does white matter matter? Spatio-temporal dynamics of task switching in aging.» *J Cogn Neurosci*, *21*, 1380-1395.

- Gruber, S. A., Rogowska, J., Holcomb, P., Soraci, S., & Yurgelun-Todd, D. (2002). «Stroop Performance in Normal Control Subjects: An fMRI Study.» *Neuroimage*, *16*, 349-360.
- Hakun, J. G., & Ravizza, S. M. (2012). Cognitive control: «Preparation of task switching components.» *Brain Res*, *1451*, 53-64.
- Hampshire, A., & Owen, A. M. (2006). «Fractionating attentional control using event-related fMRI.» *Cereb Cortex*, *16*, 1679-1689.
- Harrison, R. V., Harel, N., Panesar, J., & Mount, R. J. (2002). «Blood capillary distribution correlates with hemodynamic-based functional imaging in cerebral cortex. » *Cerebral Cortex*, *12*(3), 225-233.
- Hartley, A. A. (2001). «Age differences in dual-task interference are localized to response-generation processes.» *Psychol Aging*, *16*, 47-54.
- Hartley, A. A., Jonides, J., & Sylvester, C. Y. (2011). «Dual-task processing in younger and older adults: similarities and differences revealed by fMRI.» *Brain Cogn*, *75*, 281-291.
- Hartley, A. A., Kieley, J., & McKenzie, C. R. (1992). «Allocation of visual attention in younger and older adults.» *Percept Psychophys*, *52*, 175-185.
- Hartley, A. A., & Little, D. M. (1999). «Age-related differences and similarities in dual-task interference.» *J Exp Psychol Gen*, *128*, 416-449.
- Hedden, T., & Gabrieli, J. D. E. (2004). «Insights into the ageing mind: A View from cognitive neuroscience.» *Nature Reviews: Neuroscience*, *5*, 87-97.
- Hein, G., & Schubert, T. (2004). «Aging and input processing in dual-task situations.» *Psychol Aging*, *19*, 416-432.
- Herath, P., Klingberg, T., Young, J., Amunts, K., & Roland, P. (2001). «Neural correlates of dual task interference can be dissociated from those of divided attention: an fMRI study.» *Cereb Cortex*, *11*, 796-805.
- Hoffman, L., McDowd, J. M., Atchley, P., & Dubinsky, R. (2005). «The role of visual attention in predicting driving impairment in older adults.» *Psychol Aging*, *20*, 610.
- Hoshi, Y. (2003). «Functional near-infrared optical imaging: Utility and limitations in human brain mapping.» *Psychophysiology*, *40*, 511-520.
- Huppert, T. J., Hoge, R. D., Diamond, S. G., Franceschini, M. A., & Boas, D. A. (2006). «A temporal comparison of BOLD, ASL, and NIRS hemodynamic responses to motor stimuli in adult humans.» *Neuroimage*, *29*, 368-382.

- Jasper, H. H. (1958). «The ten twenty electrode system of the international federation.» *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 10, 371-375.
- Jiang, Y. (2004). «Resolving dual-task interference: An fMRI study.» *Neuroimage*, 22, 748-754.
- Jiang, Y., Saxe, R., & Kanwisher, N. (2004). «Functional magnetic resonance imaging provides new constraints on theories of the psychological refractory period.» *Psychol Sci*, 15, 390-396.
- Joanette, Y., Ansaldo, A. I., Parente, M. A. d. M. P., Fonseca, R. P., Kristensen, C. H., & Scherer, L. C. (2008). «Estudos de neuroimagem sobre funções executivas: evidências da técnica fNIRS.» *Psico*, 39.
- Jonides, J., Marshuetz, C., Smith, E. E., Reuter-Lorenz, P., Koeppe, R. A., & Hartley, A. A. (2000). «Age differences in behavior and PET activation reveal differences in interference resolution in verbal working memory.» *J Cogn Neurosci*, 12, 188-196.
- Kaasinen, V., Vilkmán, H., Hietala, J., Någren, K., Helenius, H., Olsson, H., Farde, L., & Rinne, J. O. (2000). «Age-related dopamine D2/D3 receptor loss in extrastriatal regions of the human brain.» *Neurobiol Aging*, 21, 683-688.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Kimberg, D. Y., Aguirre, G. K., & D'Esposito, M. (2000). «Modulation of task-related neural activity in task-switching: an fMRI study.» *Cognitive Brain Research*, 10, 189-196.
- Kramer, A. F., & Madden, D. J. (2008). Attention. In F. I. M. Craik, Salthouse, T.A. (Ed.), *The handbook of aging and cognition* (3rd ed., pp. 189–250). New York (NY): Psychology Press, Taylor and Francis Group.
- Laguë-Beauvais, M., Brunet, J., Gagnon, L., Lesage, F., & Bherer, L. (2013). «A fNIRS investigation of switching and inhibition during the modified Stroop task in younger and older adults.» *Neuroimage*, 64, 485-495.
- Langenecker, S. A., Nielson, K. A., & Rao, S. M. (2004). «fMRI of healthy older adults during Stroop interference.» *Neuroimage*, 21, 192-200.
- Larsson, A., Skoog, I., Aevansson, O., Ärlig, Å., Jacobsson, L., Larsson, L., Östling, S., & Wikkelso, C. (2001). «Regional cerebral blood flow in normal individuals aged 40, 75 and 88 years studied by 99Tcm-d, I-HMPAO SPET.» *Nuclear medicine communications*, 22, 741-746.

- Leenders, K., Perani, D., Lammertsma, A., Heather, J., Buckingham, P., Jones, T., Healy, M., Gibbs, J., Wise, R., & Hatazawa, J. (1990). «Cerebral blood flow, blood volume and oxygen utilization normal values and effect of age.» *Brain*, *113*, 27-47.
- Lefebvre, A., & Soderstrom, L. (2000). *Le vieillissement de la population québécoise : conséquences sur le financement des dépenses publiques de santé.* (pp. 1-63): Département des sciences économiques, Université McGill.
- Lenartowicz, A., Kalar, D. J., Congdon, E., & Poldrack, R. A. (2010). «Towards an Ontology of Cognitive Control.» *Topics in Cognitive Science*, *2*, 678-692.
- León-Carrion, J., Damas-López, J., Martín-Rodríguez, J. F., Domínguez-Roldán, J. M., Murillo-Cabezas, F., Barroso, Y. M. J. M., & Domínguez-Morales, M. R. (2008). «The hemodynamics of cognitive control: the level of concentration of oxygenated hemoglobin in the superior prefrontal cortex varies as a function of performance in a modified Stroop task.» *Behav Brain Res*, *193*, 248.
- Leung, H.-C., Skudlarski, P., Gatenby, J. C., Peterson, B. S., & Gore, J. C. (2000). «An Event-related Functional MRI Study of the Stroop Color Word Interference Task.» *Cereb. Cortex*, *10*, 552-560.
- Leventhal, A. G., Wang, Y., Pu, M., Zhou, Y., & Ma, Y. (2003). «GABA and its agonists improved visual cortical function in senescent monkeys.» *Science Signalling*, *300*, 812.
- Levy, B. J., & Wagner, A. D. (2011). «Cognitive control and right ventrolateral prefrontal cortex: reflexive reorienting, motor inhibition, and action updating.» *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1224*, 40-62.
- Lezak, M. D., Howieson, D. B., & Loring, D. W. (2004). *Neuropsychological assessment* (4 ed.): Oxford University Press, USA.
- Lien, M.-C., & Proctor, R. W. (2002). «Stimulus-response compatibility and psychological refractory period effects: Implications for response selection.» *Psychon Bull Rev*, *9*, 212-238.
- Logan, J. M., Sanders, A. L., Snyder, A. Z., Morris, J. C., & Buckner, R. L. (2002). «Under-recruitment and nonselective recruitment: dissociable neural mechanisms associated with aging.» *Neuron*, *33*, 827-840.
- Logothetis, N., & Wandell, B. (2004). «Interpreting the bold signal.» *Annu. Rev. Physiol.*, *66*, 735-769.

- Lou, H. C., Edvinsson, L., & MacKenzie, E. T. (1987). «The concept of coupling blood flow to brain function: revision required?.» *Annals of neurology*, 22(3), 289-297.
- Lundin-Olsson, L., Nyberg, L., & Gustafson, Y. (2006). «The mobility interaction fall chart.» *Physiotherapy research international*, 5, 190-201.
- MacDonald, A. W., Cohen, J. D., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2000). «Dissociating the Role of the Dorsolateral Prefrontal and Anterior Cingulate Cortex in Cognitive Control.» *Science*, 288, 1835-1838.
- Madden, D. J. (2001). Speed and timing of behavioral processes. In J. E. Birren & K. W. Schaie (Eds.), *Handbook of the Psychology of Aging* (5th ed., pp. 288-312). Orlando, Florida: Academic Press.
- Madden, D. J. (2007). «Aging and visual attention.» *Current Directions in Psychological Science*, 16, 70-74.
- Madden, D. J., Bennett, I. J., & Song, A. W. (2009). «Cerebral white matter integrity and cognitive aging: contributions from diffusion tensor imaging.» *Neuropsychol Rev*, 19, 415-435.
- Maquestiaux, F., Hartley, A., & Bertsch, J. (2004). «Can practice overcome age-related differences in the psychological refractory period effect?» *Psychol Aging*, 19, 649-667.
- Marois, R., Larson, J. M., Chun, M. M., & Shima, D. (2005). «Response-specific sources of dual-task interference in human pre-motor cortex.» *Psychol Res*.
- Mattay, V. S., Fera, F., Tessitore, A., Hariri, A. R., Berman, K. F., Das, S., Meyer-Lindenberg, A., Goldberg, T. E., Callicott, J. H., & Weinberger, D. R. (2006). «Neurophysiological correlates of age-related changes in working memory capacity.» *Neurosci Lett*, 392, 32-37.
- McDowd, J. M., & Shaw, R. J. (2000). Attention and aging: A functional perspective. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.), *The handbook of aging and cognition* (2 ed., pp. 221-292). Mahwah (NJ): Erlbaum.
- Mecklinger, A., Von Cramon, D. Y., Springer, A., & Matthes-von Cramon, G. (1999). «Executive control functions in task switching: evidence from brain injured patients.» *J Clin Exp Neuropsychol*, 21, 606-619.
- Mehagnoul-Schipper, D. J., van der Kallen, B. F. W., Colier, W. N. J. M., van der Sluijs, M. C., van Erning, L. J. T. O., Thijssen, H. O. M., Oeseburg, B., Hoefnagels, W. H. L., & Jansen, R. W. M. M. (2002). «Simultaneous measurements of cerebral

- oxygenation changes during brain activation by near-infrared spectroscopy and functional magnetic resonance imaging in healthy young and elderly subjects.» *Hum Brain Mapp*, 16, 14-23.
- Meyer, D. E., & Kieras, D. E. (1997a). «A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part 1. Basic mechanisms.» *Psychol Rev*, 104, 3-65.
- Meyer, D. E., & Kieras, D. E. (1997b). «A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part 2. Accounts of psychological refractory-period phenomena.» *Psychol Rev*, 104, 749.
- Meyer, D. E., Kieras, D. E., Lauber, E., Schumacher, E. H., Glass, J., Zurbriggen, E., Gmeindl, L., & Apfelblat, D. (1995). «Adaptive executive control: Flexible multiple-task performance without pervasive immutable response-selection bottlenecks.» *Acta Psychol (Amst)*, 90, 163-190.
- Milan, A. (2011). *Structure par âge et sexe : Canada, provinces et territoires, 2010*. (pp. 9): Statistique Canada.
- Milham, M. P., Erickson, K. I., Banich, M. T., Kramer, A. F., Webb, A., Wszalek, T., & Cohen, N. J. (2002). «Attentional Control in the Aging Brain: Insights from an fMRI Study of the Stroop Task.» *Brain Cogn*, 49, 277-296.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). «An integrative theory of prefrontal cortex function.» *Annual review of neuroscience*, 24, 167-202.
- Mitchell, R. L. C. (2010). «Linear increases in BOLD response associated with increasing proportion of incongruent trials across time in a colour Stroop task.» *Experimental brain research*, 203, 193-204.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). «The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis.» *Cogn Psychol*, 41, 49-100.
- Monsell, S. (2003). «Task switching.» *Trends in cognitive sciences*, 7, 134-140.
- Niendam, T. A., Laird, A. R., Ray, K. L., Dean, Y. M., Glahn, D. C., & Carter, C. S. (2012). «Meta-analytic evidence for a superordinate cognitive control network subserving diverse executive functions.» *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 1-28.
- Nieto-Sampedro, M., & Nieto-Diaz, M. (2005). «Neural plasticity: changes with age.» *Journal of neural transmission*, 112, 3-27.
- Obrig, H., & Villringer, A. (2003). «Beyond the visible: Imaging the human brain with light.» *J Cereb Blood Flow Metab*, 23, 1-18.

- Okamoto, M., Dan, H., Sakamoto, K., Takeo, K., Shimizu, K., Kohno, S., Oda, I., Isobe, S., Suzuki, T., Kohyama, K., & Dan, I. (2004). «Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10-20 system oriented for transcranial functional brain mapping.» *Neuroimage*, *21*, 99-111.
- Park, D. C., & Reuter-Lorenz, P. (2009). «The adaptive brain: aging and neurocognitive scaffolding.» *Annu Rev Psychol*, *60*, 173.
- Pashler, H., & Johnston, J. C. (1998). Attentional limitations in dual-task performance. In H. Pashler (Ed.), *Attention* (pp. 155-189). Hove, England: Psychology Press, Erlbaum (UK), Taylor and Francis.
- Prakash, R. S., Erickson, K. I., Colcombe, S. J., Kim, J. S., Voss, M. W., & Kramer, A. F. (2009). «Age-related differences in the involvement of the prefrontal cortex in attentional control.» *Brain Cogn*, *71*, 328.
- Pfurtscheller, G., Ortner, R., Bauernfeind, G., Linortner, P., & Neuper, C. (2010). «Does conscious intention to perform a motor act depend on slow cardiovascular rhythms?» *Neurosci Lett*, *468*, 46-50.
- Rajah, M. N., & D'Esposito, M. (2005). «Region-specific changes in prefrontal function with age: a review of PET and fMRI studies on working and episodic memory.» *Brain*, *128*, 1964-1983.
- Raz, N. (2000). Aging of the Brain and Its Impact on Cognitive Performance: Integration of Structural and Functional Findings. In F. I. M. S. Craik, T. A. (Ed.), *Handbook of Aging and Cognition* (pp. 1-90). New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Raz, N., Ghisletta, P., Rodrigue, K. M., Kennedy, K. M., & Lindenberger, U. (2010). «Trajectories of brain aging in middle-aged and older adults: regional and individual differences.» *Neuroimage*, *51*, 501-511.
- Reitan, R. M., & Wolfson, D. (1985). *The Halstead-Reitan neuropsychological test battery: Theory and clinical interpretation*. Tucson (AZ): Neuropsychology Press.
- Reuter-Lorenz, P. A. (2002). «New visions of the aging mind and brain.» *Trends in cognitive sciences*, *6*, 394-400.
- Reuter-Lorenz, P. A., & Cappell, K. A. (2008). «Neurocognitive aging and the compensation hypothesis.» *Current Directions in Psychological Science*, *17*, 177-182.
- Reuter-Lorenz, P. A., & Lustig, C. (2005). «Brain aging: reorganizing discoveries about the aging mind.» *Current opinion in neurobiology*, *15*, 245-251.

- Reuter-Lorenz, P. A., & Park, D. C. (2010). «Human neuroscience and the aging mind: a new look at old problems.» *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 65, 405-415.
- Rogers, R., Sahakian, B., Hodges, J., Polkey, C., Kennard, C., & Robbins, T. (1998). «Dissociating executive mechanisms of task control following frontal lobe damage and Parkinson's disease.» *Brain*, 121, 815-842.
- Rogers, R. D., & Monsell, S. (1995). «Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks.» *Journal of experimental psychology: General*, 124, 207.
- Rushworth, M., Hadland, K., Paus, T., & Sipila, P. (2002). «Role of the human medial frontal cortex in task switching: a combined fMRI and TMS study.» *Journal of Neurophysiology*, 87, 2577-2592.
- Ruthruff, E., Pashler, H. E., & Hazeltine, E. (2003). «Dual-task interference with equal task emphasis: graded capacity sharing or central postponement?» *Percept Psychophys*, 65, 801-816.
- Rypma, B., & D'Esposito, M. (2000). «Isolating the neural mechanisms of age-related changes in human working memory.» *Nat Neurosci*, 3, 509-515.
- Safonova, L. P., Michalos, A., Wolf, U., Wolf, M., Hueber, D. M., Choi, J. H., Gupta, R., Polzonetti, C., Mantulin, W. W., & Gratton, E. (2004). «Age-correlated changes in cerebral hemodynamics assessed by near-infrared spectroscopy.» *Arch Gerontol Geriatr*, 39, 207-225.
- Salthouse, T. A., Hambrick, D. Z., & McGuthry, K. E. (1998). «Shared age-related influences on cognitive and noncognitive variables.» *Psychol Aging*, 13, 486.
- Salthouse, T. A., & Somberg, B. L. (1982). «Isolating the age deficit in speeded performance.» *J Gerontol*, 37, 59-63.
- Schroeter, M. L., Zysset, S., Kruggel, F., & Von Cramon, D. Y. (2003). «Age dependency of the hemodynamic response as measured by functional near-infrared spectroscopy.» *Neuroimage*, 19, 555-564.
- Schroeter, M. L., Zysset, S., Kupka, T., Kruggel, F., & von Cramon, D. Y. (2002). «Near-infrared spectroscopy can detect brain activity during a color-word matching Stroop task in an event-related design.» *Hum Brain Mapp*, 17, 61-71.
- Schubert, T., & Szameitat, A. J. (2003). «Functional neuroanatomy of interference in overlapping dual tasks: an fMRI study.» *Brain Res Cogn Brain Res*, 17, 733-746.

- Schumacher, E. H., Seymour, T. L., Glass, J. M., Fencsik, D. E., Lauber, E. J., Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (2001). «Virtually perfect time sharing in dual-task performance: Uncorking the central cognitive bottleneck.» *Psychol Sci*, *12*, 101-108.
- Sigman, M., & Dehaene, S. (2005). «Parsing a cognitive task: a characterization of the mind's bottleneck.» *PLoS Biol*, *3*, e37.
- Sigman, M., & Dehaene, S. (2008). «Brain mechanisms of serial and parallel processing during dual-task performance.» *J Neurosci*, *28*, 7585-7598.
- Smith, E. E., Geva, A., Jonides, J., Miller, A., Reuter-Lorenz, P., & Koeppel, R. A. (2001). «The neural basis of task-switching in working memory: effects of performance and aging.» *Proc Natl Acad Sci U S A*, *98*, 2095-2100.
- Sohn, M.-H., Ursu, S., Anderson, J. R., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2000). «Inaugural Article: The role of prefrontal cortex and posterior parietal cortex in task switching.» *PNAS*, *97*, 13448-13453.
- Spreng, R. N., Wojtowicz, M., & Grady, C. L. (2010). «Reliable differences in brain activity between young and old adults: a quantitative meta-analysis across multiple cognitive domains.» *Neurosci Biobehav Rev*, *34*, 1178.
- Spring, O., & Benton, A. L. (1997). *Neurosensory Centre for Comprehensive Examination of Aphasia (NCCEA)*. Victoria (BC): Neuropsychological Laboratory, University of Victoria.
- Strangman, G., Franceschini, M. A., & Boas, D. A. (2003). «Factors affecting the accuracy of near-infrared spectroscopy concentration calculations for focal changes in oxygenation parameters.» *Neuroimage*, *18*, 865-879.
- Stroop, J. R. (1935). «Studies of interference in serial verbal reactions.» *Journal of Experimental Psychology*, *18*, 643-661.
- Stuss, D. T., & Alexander, M. (2000). Executive functions and the frontal lobes: a conceptual view.» *Psychol Res*, *63*, 289-298.
- Stuss, D. T., & Knight, R. T. (2002). *Principles of frontal lobe function*: Oxford University Press, USA.
- Suhr, J., & Chelberg, M. (2012). «Use of near-infrared spectroscopy as a measure of cerebrovascular health in aging adults.» *Neuropsychol Dev Cogn B Aging Neuropsychol Cogn*.
- Szameitat, A. J., Schubert, T., Müller, K., & von Cramon, D. Y. (2002). «Localization of executive functions in dual-task performance with fMRI.» *J Cogn Neurosci*, *14*, 1184-1199.

- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2001). *Using Multivariate Statistics* (4 ed.). Needham Heights (MA): Allyn & Bacon.
- Toro, R., Fox, P. T., & Paus, T. (2008). «Functional coactivation map of the human brain.» *Cereb Cortex*, *18*, 2553-2559.
- Turner, G. R., & Spreng, R. N. (2012). «Executive functions and neurocognitive aging: dissociable patterns of brain activity.» *Neurobiol Aging*, *33*, 826. e821-826. e813.
- Verghese, J., & Xue, X. (2011). «Predisability and gait patterns in older adults.» *Gait Posture*, *33*, 98-101.
- Verhaeghen, P. (2011). «Aging and executive control: reports of a demise greatly exaggerated.» *Current Directions in Psychological Science*, *20*, 174-180.
- Verhaeghen, P., & Cerella, J. (2002). «Aging, executive control, and attention: a review of meta-analyses.» *Neurosci Biobehav Rev*, *26*, 849-857.
- Verhaeghen, P., & De Meersman, L. (1998). «Aging and the Stroop effect: A meta-analysis.» *Psychol Aging*, *13*, 120.
- Verhaeghen, P., Steitz, D. W., Sliwinski, M. J., & Cerella, J. (2003). «Aging and dual-task performance: a meta-analysis.» *Psychol Aging*, *18*, 443-460.
- Vince, M. A. (1948). «The intermittency of control movements and the psychological refractory period.» *British Journal of Psychology. General Section*, *38*, 149-157.
- Wasylyshyn, C., Verhaeghen, P., & Sliwinski, M. J. (2011). «Aging and task switching: A meta-analysis.» *Psychol Aging*, *26*, 15.
- Wechsler, D. (1981). *Wechsler Adult Intelligence Scale - Revised Manual*. New York (NY): The Psychological Corporation.
- Welford, A. T. (1952). «An apparatus for use in studying serial performance.» *Am J Psychol*, *65*, 91-97.
- Wylie, G. R., Javitt, D. C., & Foxe, J. J. (2004). «Don't think of a white bear: An fMRI investigation of the effects of sequential instructional sets on cortical activity in a task-switching paradigm.» *Hum Brain Mapp*, *21*, 279-297.
- Yesavage, J. A. (1988). «Geriatric Depression Scale.» *Psychopharmacol Bull*, *24*, 709-711.
- Yeung, N., Nystrom, L. E., Aronson, J. A., & Cohen, J. D. (2006). «Between-task competition and cognitive control in task switching.» *The Journal of Neuroscience*, *26*, 1429-1438.

- Zarahn, E., Rakitin, B., Abela, D., Flynn, J., & Stern, Y. (2007). «Age-related changes in brain activation during a delayed item recognition task.» *Neurobiol Aging*, 28, 784-798.
- Zysset, S., Schroeter, M. L., Neumann, J., & Yves von Cramon, D. (2007). «Stroop interference, hemodynamic response and aging: An event-related fMRI study.» *Neurobiol Aging*, 28, 937-946.