

Université de Montréal

**Contrôle attentionnel et vieillissement normal :  
Contribution à la mémoire de travail et variabilité  
interindividuelle**

par  
Stéphanie Sylvain-Roy

Département de psychologie  
Faculté des arts et sciences

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures et postdoctorales  
en vue de l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph.D.)  
en psychologie – recherche et intervention  
option neuropsychologie clinique

mars, 2013

© Stéphanie Sylvain-Roy, 2013

## Résumé

Dans le contexte actuel du vieillissement de la population, il importe de s'intéresser aux changements qui surviennent avec l'avancement en âge. Le vieillissement s'accompagne de modifications pour différentes fonctions cognitives, dont la mémoire de travail (MdeT), un système permettant le maintien temporaire et la manipulation d'une petite quantité d'informations. Les travaux de cette thèse portent sur le vieillissement normal de la MdeT et des fonctions de contrôle attentionnel (FCA) qui la sous-tendent (l'alternance, l'inhibition et la mise à jour).

D'abord, la première étude (Chapitre II) visait à préciser l'effet du vieillissement normal sur la MdeT et sur chacune des FCA qui la sous-tendent. Elle avait également pour but d'identifier les FCA qui contribuent à la réalisation de différentes tâches de MdeT, et si cette contribution diffère selon le groupe d'âge. Des tâches mesurant chacune des FCA ainsi que des tâches de MdeT ont été administrées à des personnes âgées et à des jeunes adultes. Les analyses contrôlant pour le ralentissement cognitif ont révélé que les habiletés d'alternance et de mise à jour sont préservées chez les personnes âgées, mais que l'inhibition est atteinte comparativement aux jeunes adultes. Les analyses ont également montré que l'impact du vieillissement sur la MdeT dépend de la tâche utilisée. Enfin, les résultats ont indiqué que la contribution des FCA à la MdeT dépend à la fois de la tâche de MdeT et du groupe d'âge. En particulier, la mise à jour contribue davantage à la MdeT des personnes âgées qu'à celle des jeunes, ce qui pourrait refléter une tentative de compensation.

La seconde étude (Chapitre III) avait pour objectif de caractériser la variabilité interindividuelle au niveau des FCA, pour les personnes âgées et pour les jeunes adultes. Des analyses hiérarchiques en grappes réalisées sur les habiletés d'alternance, d'inhibition et de mise à jour, ont permis de déterminer si différents profils de contrôle attentionnel étaient présents. L'étude cherchait également à déterminer si les individus appartenant à des profils de contrôle attentionnel distincts diffèrent quant à certaines variables intellectuelles ou de santé.

Les analyses ont mis en évidence trois profils de contrôle attentionnel distincts parmi les personnes âgées, l'inhibition étant une FCA critique pour distinguer entre les trois sous-groupes. Trois profils de contrôle attentionnel ont également été identifiés chez les jeunes adultes, et ces profils étaient caractérisés par moins de variabilité intra-individuelle que ceux des âgés. Les analyses ont par ailleurs montré que les profils de contrôle attentionnel se distinguent sur certaines variables intellectuelles et de santé. Les implications théoriques et cliniques de ces résultats seront discutées en fin de thèse (Chapitre IV).

**Mots-clés** : mémoire de travail, contrôle attentionnel, vieillissement normal, alternance, inhibition, mise à jour, variabilité interindividuelle.

## **Abstract**

As the population is aging, it is increasingly important to study the changes that occur with advancing age. Normal aging is characterized by changes in various cognitive functions, such as working memory (WM), a limited capacity system that temporarily holds and manipulates a small quantity of information. The work presented in this thesis focused on the normal aging of WM and of the attentional control functions (ACFs) that underlie this system (shifting, inhibition, and updating).

The first study (Chapter II) aimed at exploring the impact of normal aging on WM and on each of the ACFs. We also sought to determine which ACFs contribute to performance on different WM tests, and whether age group has an impact on those contributions. Tasks measuring each ACF as well as WM tasks were administered to healthy older adults and to younger adults. The analyses controlling for cognitive slowing revealed that older adults' shifting and updating abilities are preserved, but that their inhibition abilities are impaired compared to younger adults. Moreover, the impact of normal aging on WM is task-dependent. The results also indicated that the relative contribution of the ACFs to WM depends on both the WM task used and the age group. In particular, older adults relied more than younger adults on updating to perform WM tasks, which might reflect a compensation attempt.

The second study (Chapter III) aimed at characterizing interindividual variability in the ACFs of both older and younger adults. Cluster analyses were performed on the shifting, inhibition, and updating abilities, in order to determine whether different attentional control profiles were present. This study also explored whether the individuals that belonged to distinct attentional control profiles differed as to intellectual and health variables. The analyses revealed three attentional control profiles among older adults, and inhibition was the ACF for which the three profiles differed the most. Three attentional control profiles were also identified among younger adults, and their profiles were characterized by less intra-individual variability than those of older adults. The results also showed that individuals belonging to

different attentional control profiles differed on some intellectual and health variables. The theoretical and clinical implications of those findings are discussed in Chapter IV.

**Keywords** : working memory, executive control, normal aging, shifting, inhibition, updating, interindividual variability.

# Table des matières

<b>Résumé</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iii</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>viii</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>ix</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>x</b>
<b>Remerciements</b> .....	<b>xi</b>
<b>CHAPITRE I : Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
Contexte .....	2
1.1 La mémoire de travail .....	3
1.1.1 Définition .....	3
1.1.2 Modèle théorique de Baddeley .....	4
1.1.3 Le contrôle attentionnel dans le modèle de Baddeley .....	4
1.1.4 Fractionnement du contrôle attentionnel .....	5
1.1.5 Le modèle de Miyake et ses collaborateurs .....	6
1.2 Le vieillissement cognitif normal .....	8
1.2.1 Vieillissement normal et mémoire de travail .....	8
1.2.2 Vieillissement normal et fonctions de contrôle attentionnel .....	13
1.3 Contribution des fonctions de contrôle attentionnel à des tâches complexes .....	18
1.3.1 Effet du vieillissement .....	22
1.4 Variabilité interindividuelle .....	23
1.4.1 Variabilité interindividuelle et vieillissement cognitif normal .....	23
1.4.2 Variabilité interindividuelle et fonctions de contrôle attentionnel .....	25
1.4.3 Facteurs associés aux différences individuelles sur le plan cognitif .....	26
1.5 Objectifs et hypothèses de recherche .....	27
1.5.1 Article 1 : .....	28
1.5.2 Article 2 : .....	29

<b>CHAPITRE II : Article 1 .....</b>	<b>31</b>
Sylvain-Roy, S., Lungu, O., & Belleville, S. (en préparation). Normal aging of the attentional control functions that underlie working memory.	
<b>CHAPITRE III : Article 2 .....</b>	<b>73</b>
Sylvain-Roy, S., & Belleville, S. (en préparation). Interindividual differences in attentional control profiles among younger and older adults.	
<b>CHAPITRE IV : Discussion générale .....</b>	<b>113</b>
4.1 Rappel des objectifs et synthèse des résultats .....	114
4.1.1 Synthèse des résultats de l'article 1 .....	114
4.1.2 Synthèse des résultats de l'article 2 .....	115
4.2 Implications théoriques de la thèse .....	117
4.2.1 La séparabilité des fonctions de contrôle attentionnel .....	117
4.2.2 Les fonctions de contrôle attentionnel .....	118
4.2.3 L'utilisation différentielle des fonctions de contrôle attentionnel selon l'âge .....	120
4.2.4 Contribution de la vitesse de traitement .....	122
4.2.5 Mémoire de travail et vieillissement .....	123
4.2.6 La variabilité interindividuelle .....	125
4.2.7 Hypothèses alternatives .....	127
4.3 Implications cliniques générales de la thèse .....	129
4.4 Limites de la thèse .....	131
4.5 Perspectives futures .....	132
<b>RÉFÉRENCES POUR INTRODUCTION ET DISCUSSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>135</b>
<b>ANNEXE I : Article 3 .....</b>	<b>xii</b>
Sylvain-Roy, S., Bherer, L., & Belleville, S. (2010). Contribution of temporal preparation and processing speed to simple reaction time in persons with	

Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *Brain and Cognition*, 74(3), 255-261.

**ANNEXE II : Chapitre de livre ..... xlii**

Belleville, S., Sylvain-Roy, S., De Boysson, C., & Ménard, M.-C.. (2008). Chapter 23: Characterizing the memory changes in persons with mild cognitive impairment. In W.S. Sossin, J.-C. Lacaille, V.F. Castellucci, & S. Belleville (Eds.), *Progress in Brain Research*, 169, 365-375.



# Liste des tableaux

## Chapitre II

<b>Table 1</b> : Group means and standard deviations (in parenthesis) for demographic characteristics and performance on neuropsychological measures .....	69
<b>Table 2</b> : Mean performance and standard deviations (in parenthesis) on the tasks measuring each attentional control function and processing speed .....	70
<b>Table 3</b> : Distribution characteristics of the composite scores and means for each group.....	71
<b>Table 4</b> : Significant predictor variables in the final multiple regression model for each complex working memory task .....	72

## Chapitre III

<b>Table 1</b> : Older adults' means and standard deviations (in parenthesis) for demographic, intellectual and health variables, by cluster .....	110
<b>Table 2</b> : Young adults' means and standard deviations (in parenthesis) for demographic, intellectual and health variables, by cluster .....	111

## Annexe I

<b>Table 1</b> : Group means for demographic characteristics and performance on neuropsychological measures .....	xxxix
<b>Table 2</b> : Mean log-transformed execution times (in ms) for each group (standard deviations are shown in parenthesis) .....	xl

# Liste des figures

## Chapitre II

<b>Figure 1</b> : Impact of normal aging on performance on the complex working memory tasks .....	73
---	----

## Chapitre III

<b>Figure 1</b> : Older adults' mean attentional control composite scores, by cluster .....	112
<b>Figure 2</b> : Younger adults' mean attentional control composite scores, by cluster .....	113

## Annexe I

<b>Figure 1</b> : Mean log-transformed initiation times as a function of PIs in the long and short temporal windows for AD, MCI and HC participants .....	xli
---	-----

## Annexe II

<b>Figure 1</b> : Theoretical changes in cognitive functions in persons with healthy aging and persons with Alzheimer's disease .....	lxxiii
---	--------

## Liste des abréviations

ACF	attentional control function
AD	Alzheimer's disease
ANOVA	analyse de variance
ANCOVA	analyse de covariance
BDI	Beck Depression Inventory
BEM-144	Batterie d'Efficiencé Mnésique
DRM	Deese-Roediger-McDermot paradigm
ET	execution time
FCA	fonctions de contrôle attentionnel
GDS	Geriatric Depression Scale
HC	healthy controls
IT	initiation time
MANCOVA	analyse multivariée de covariance
MCI	mild cognitive impairment
MdeT	mémoire de travail
MDRS	Mattis Dementia Rating Scale
MMSE	Mini Mental State Examination
MoCA	Montreal Cognitive Assessment
PI	preparatory interval
RL/RI-16	rappel libre/rappel indicé à 16 items
RT	reaction time
SAS	système attentionnel superviseur
SMAF	Système de Mesure de l'Autonomie Fonctionnelle
WAIS-III	Wechsler Adult Intelligence Scale, 3rd edition
WM	working memory

## Remerciements

Je tiens d'abord à remercier chaleureusement Sylvie Belleville, ma directrice de thèse, pour l'aide inestimable qu'elle m'a apportée tout au long de ma formation en recherche. Je suis profondément reconnaissante pour sa grande disponibilité, sa générosité, sa rigueur scientifique, et son souci de nous offrir une formation de la meilleure qualité qui soit. Sa passion pour la recherche fut pour moi une source d'inspiration qui m'a poussée à me dépasser.

J'adresse aussi un grand merci aux autres membres de mon laboratoire. Je pense d'abord à Émilie Lepage et Samira Mellah qui ont fait preuve d'une grande générosité, autant au niveau technique que moral. Merci également aux stagiaires d'été Sophie Benoit et Émilie Ouellet, pour leur aide avec le recrutement des participants et la collecte des données. Je suis aussi profondément reconnaissante envers l'équipe informatique (Johane Landry, Dominic Beaulieu, Marcelo Sequeira, et Marc Filarétos) et Francine Giroux, statisticienne. Au-delà de leurs grandes compétences, j'ai été à maintes reprises touchée par leur incroyable générosité et gentillesse. J'ai également une chaleureuse pensée pour les collègues du laboratoire, anciens (Marie-Claude, Sylvia, Lyssa, Francis, Sara, Véronique, mais aussi Magalie et Anne-Laure) et actuels (Nicolas, Benjamin, Joni, Hélène, Audrey), que j'ai eu beaucoup de plaisir à côtoyer.

J'aimerais par ailleurs souligner le dévouement et la patience des participants de recherche. Merci également aux organismes subventionnaires qui ont appuyé financièrement ma formation en recherche, particulièrement le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie (CRSNG) et le Fonds de Recherche du Québec – Nature et Technologie (FQRNT).

Je tiens également à remercier chaleureusement mes superviseurs d'internats et de stages, en particulier Chantal Mailloux et Alessandra Schiavetto. Ces neuropsychologues passionnées ont su me transmettre leur enthousiasme pour le travail clinique.

J'ai eu la chance de forger des amitiés très précieuses au cours de cette longue aventure. Je pense particulièrement à Alexandra Fortin-Girard, Anne-Sophie Langlois, Jacinthe Lacombe, Émilie Fortier, Karen Debas, Noémie Hébert-Lalonde, Laura Lefebvre, Bianca Bier et Karine Ferron. Votre présence a rendu cette expérience drôlement plus agréable. J'ai également pu compter sur la confiance de mes amis de longue date : Maryse Robidoux, Alan Sih, Philippe Alain et Sylvie Cloutier. Merci aussi à Frédérique Bax-D'Auteuil, Dominic Lapointe, Jacinthe Lemelin, et Élodie Allain pour leur présence et leur enthousiasme. Je tiens également à souligner le support constant d'Alan O'Brien. Un merci particulier à mon amoureux Jean-Charles pour ses encouragements, sa patience, et sur qui j'ai pu compter pour m'apporter légèreté et bonheur dans les moments plus difficiles.

Mais surtout, je ne pourrai jamais remercier suffisamment mes parents et ma sœur. Cette aventure n'aurait jamais été possible sans vous. Votre confiance et votre support inconditionnels depuis le début ont à mes yeux une valeur inestimable.

# **CHAPITRE 1**

## **Introduction générale**

## Contexte

Le vieillissement de la population représente un enjeu public de plus en plus préoccupant. Au Canada, les personnes âgées de 65 ans et plus constituent le groupe d'âge dont la croissance est la plus rapide, de sorte que Statistiques Canada projette qu'un Canadien sur quatre en fera partie d'ici les 40 prochaines années. De tels changements démographiques ne sont pas sans conséquence aux niveaux social et économique. Par définition, la plupart des individus présentent un vieillissement dit « normal ». Pourtant, au sein du vieillissement normal, une importante variabilité interindividuelle est présente, de sorte que certains individus subissent moins les impacts négatifs du vieillissement sur leur fonctionnement. Il apparaît crucial de s'intéresser aux changements qui caractérisent le vieillissement normal et aux facteurs qui font que certains individus âgés présentent moins d'atteintes que d'autres, notamment au plan cognitif.

Bien que plusieurs domaines cognitifs puissent subir des modifications dans le vieillissement, les fonctions exécutives sont l'un des aspects essentiels à l'efficacité du fonctionnement dans la vie de tous les jours. Ces fonctions représentent un ensemble de processus cognitifs qui permettent de contrôler le comportement afin d'agir efficacement face à une situation nouvelle demandant la planification et l'organisation d'une série d'étapes. Elles permettent également de s'autoréguler et de se corriger en cas d'erreur. Étant très complexes, ces fonctions reposeraient sur des processus de contrôle attentionnel plus fins, qui seraient accomplis par la mémoire de travail (MdeT). Un contrôle efficace de l'attention est crucial pour bon nombre d'activités cognitives complexes (Strauss, Sherman, & Spreen, 2006) et pour l'accomplissement des activités instrumentales de la vie quotidienne comme la gestion financière ou la prise de médicaments (Bell-McGinty, Podell, Franzen, Baird, & Williams, 2002; Jefferson, Paul, Ozonoff, & Cohen, 2006; Vaughan & Giovanello, 2010).

Or, il s'agit d'un fait bien établi que le vieillissement normal s'accompagne de modifications des fonctions exécutives (Phillips & Henry, 2008). Au-delà de ces atteintes normales associées à l'âge, un déclin du contrôle attentionnel constituerait un marqueur précoce de certaines maladies neurodégénératives, et serait présent avant même l'apparition de

la maladie (Albert, Moss, Tanzi, & Jones, 2001; Backman, Jones, Berger, Laukka, & Small, 2005; Belanger & Belleville, 2009; Belleville, Chertkow, & Gauthier, 2007; Blacker et al., 2007; Chen et al., 2001). Il est donc essentiel de comprendre ce qui sous-tend le déclin des fonctions exécutives avec l'âge. Il est également crucial de bien documenter la présence et l'ampleur de la variabilité interindividuelle au niveau des processus exécutifs de base dans le vieillissement normal. Une meilleure compréhension des changements normaux associés au vieillissement permettrait notamment de statuer sur l'aspect normal ou pathologique d'un profil, dans une optique d'intervention précoce, le cas échéant. Il importe également de bien comprendre les facteurs qui sont associés à cette variabilité existant entre les individus quant aux fonctions de contrôle attentionnel (FCA). Les résultats issus de cette thèse pourraient permettre de caractériser les atteintes des FCA qui sont normales dans le vieillissement, et les facteurs qui sont associés à un vieillissement plus réussi de ces fonctions. Ceci pourrait également contribuer à la compréhension des difficultés vécues par les personnes âgées dans les activités de leur vie quotidienne.

La première partie de cette introduction présentera la MdeT et les FCA qui la sous-tendent. La deuxième partie traitera du vieillissement cognitif normal, tandis que la troisième partie fera état de la variabilité interindividuelle sur le plan du fonctionnement cognitif. Les objectifs généraux de la thèse ainsi que les hypothèses rattachées à chaque article seront ensuite présentés.

## **1.1 La mémoire de travail**

### **1.1.1 Définition**

La MdeT est un système permettant le maintien temporaire d'une quantité limitée d'informations dans un état actif et rapidement accessible, ainsi que la manipulation de cette information (Baddeley, 1986). Ce système coordonne les ressources cognitives afin de pouvoir effectuer un stockage et un traitement simultanés de l'information. Ceci est nécessaire pour accomplir une grande variété d'activités cognitives complexes, telles que la compréhension du langage, le calcul mental, la prise de notes et le raisonnement logique (Baddeley & Logie, 1999). Au niveau cérébral, la MdeT repose principalement sur le cortex préfrontal (Cohen et al., 1997). D'autres réseaux neuronaux sont impliqués dans son fonctionnement, tels que des



boucles incluant des structures striatales (Monchi, Petrides, Strafella, Worsley, & Doyon, 2006; Monchi, Taylor, & Dagher, 2000; O'Reilly & Frank, 2006) ainsi que des faisceaux de matière blanche fronto-pariétaux (Burzynska et al., 2011).

### **1.1.2 Modèle théorique de Baddeley**

Différents modèles théoriques ont été proposés pour rendre compte du fonctionnement de la MdeT. Le plus influent est sans contredit le modèle à composantes multiples de Baddeley (1986; Baddeley & Hitch, 1974), qui postule trois systèmes à capacité limitée opérant en interaction. Deux sous-systèmes esclaves, la boucle phonologique et le registre visuospatial se spécialisent chacun pour le maintien temporaire de matériel verbal ou non verbal. Un troisième système, l'administrateur central, permet de coordonner l'information issue des deux sous-systèmes esclaves et serait responsable du contrôle attentionnel (Baddeley, 1992; Engle, 2002). Cette composante constituant l'objet du présent projet, elle sera décrite plus en détail dans la section suivante.

### **1.1.3 Le contrôle attentionnel dans le modèle de Baddeley**

L'administrateur central est conceptualisé comme un système de contrôle attentionnel régulant la portion active de la mémoire (Baddeley & Logie, 1999). En ce sens, cette composante relèverait davantage de l'attention que de la mémoire, et serait responsable de différentes fonctions exécutives. Les processus contrôlés attribués à l'administrateur central rejoindraient d'ailleurs plusieurs aspects des modèles attentionnels courants (Baddeley, 1996a; Baddeley & Logie, 1999).

En 1986, une première tentative fut faite par Baddeley pour spécifier le fonctionnement de l'administrateur central, et il endosse d'ailleurs toujours cette conceptualisation (Baddeley, 2012). Il a alors postulé que le « système attentionnel superviseur » (SAS) du modèle de contrôle attentionnel de Norman et Shallice (1986) pouvait rendre compte du fonctionnement de l'administrateur central. Le SAS permet notamment d'agir à l'encontre des patrons de réponse habituels lorsqu'il est plus approprié d'initier un nouveau comportement, via la mise en place de processus d'inhibition et d'activation sélective. Dans le même esprit, Engle, Kane et Tuholski (1999) décrivent l'administrateur

central comme un système permettant d'activer les informations pertinentes par le biais d'une récupération contrôlée, et de maintenir cette activation tout en bloquant les sources d'interférence. L'administrateur central a également pour fonction de coordonner les informations provenant des deux sous-systèmes esclaves et de les manipuler (Baddeley, 1992; Baddeley & Logie, 1999). Il gère aussi les informations provenant de sources externes à la MdeT (Collette, Peters, Hogge, & Majerus, 2007), par exemple des informations provenant de la mémoire à long terme. Un tel contrôle exécutif serait impliqué dans le monitoring et la régulation des différents processus cognitifs (Luszcz, 2011). Dans la vie quotidienne, l'intégration et la réorganisation des informations provenant de plusieurs sources sont nécessaires dans une grande variété d'activités, telles que la prise de décision, la résolution de problèmes, et la planification de comportements orientés vers un but (Glisky, 2007).

#### **1.1.4 Fractionnement du contrôle attentionnel**

Dans les premières années suivant la publication du modèle de Baddeley, l'administrateur central était conceptualisé comme un système de contrôle relativement unitaire, c'est-à-dire un système hautement intégré de ressources générales de traitement à capacité limitée, responsable d'une variété de sous-processus dits exécutifs (Baddeley, 1996b, 2002a, 2003, 2012; Duncan, Emslie, Williams, Johnson, & Freer, 1996). Certains auteurs ont cependant remis en question son caractère unitaire, car force était de constater que plusieurs fonctions relativement différentes lui étaient attribuées (ex. : Levine et al., 1998). Baddeley (1998, 2012) a lui-même proposé que l'administrateur central puisse être fractionné en différents sous-processus exécutifs. L'idée d'un fractionnement de l'administrateur central reposait sur plusieurs observations empiriques. D'abord, la variété et la complexité des déficits exécutifs observés chez les patients en neuropsychologie clinique constituaient des arguments appuyant cette idée (Baddeley, 1996a). En effet, des patients avec lésions frontales peuvent avoir des performances normales à certaines tâches dites exécutives tout en ayant d'importantes difficultés à d'autres tâches aussi qualifiées d'exécutives (Godefroy, 2003; Godefroy, Cabaret, Petit-Chenal, Pruvo, & Rousseaux, 1999; Stuss, 2011). Des études en imagerie cérébrale fonctionnelle ont également fourni des évidences en faveur d'un fractionnement des fonctions exécutives de la MdeT (ex. : Collette et al., 2005; Robbins, 1996; Wager & Smith, 2003). Enfin, des études auprès de jeunes adultes (Lehto, 1996) et de

personnes âgées normales (Rabbitt & Lowe, 2000) ont révélé des corrélations relativement faibles ( $r = .40$  ou moins) et souvent non significatives entre les performances à différentes tâches typiquement attribuées à l'administrateur central, ce qui suggère que ces tâches mesurent des composantes dissociables au sein de ce système. Le fractionnement de ce système en différentes FCA plus ou moins indépendantes en facilite d'ailleurs considérablement l'abord empirique, tant chez les populations normales que cliniques.

Différents types de fractionnement ont été proposés afin de rendre compte de la diversité des fonctions attribuées à l'administrateur central (ex. : Burgess & Shallice, 1996; Engle & Kane, 2004; Levine et al., 1998; Stuss, 2011; Stuss, Shallice, Alexander, & Picton, 1995; West, 1996). En particulier, Baddeley (1996a) postule la présence de quatre composantes exécutives. Les composantes qu'il propose sont la division de l'attention entre deux tâches simultanées, l'alternance de l'attention entre différentes stratégies de récupération, l'activation temporaire d'éléments contenus en mémoire à long terme et l'attention sélective. Cette dernière composante est très reliée à l'inhibition qui, selon l'auteur, devrait être l'une des composantes de tout modèle qui tente de spécifier les fonctions de l'administrateur central. Notons toutefois que ni dans cet article, ni dans les années qui ont suivi (ex. : Baddeley, 2002b), l'organisation et/ou la séparabilité de ces fonctions n'ont été examinées empiriquement par Baddeley.

### **1.1.5 Le modèle de Miyake et de ses collaborateurs**

Devant cette proposition de Baddeley (1996a) selon laquelle diverses fonctions sont attribuables à l'administrateur central, un certain nombre d'auteurs ont tenté de déterminer empiriquement la séparabilité de ces fonctions. À l'heure actuelle, le modèle de Miyake et al. (2000) constitue la proposition de fractionnement la plus influente et sur laquelle plusieurs études subséquentes se sont basées (Luszcz, 2011). Bien que des parallèles évidents puissent être établis entre les fonctions de ce modèle et celles originellement proposées par Baddeley, les auteurs ont opté pour trois fonctions pouvant être définies de façon opérationnelle, qui sont par le fait même moins complexes que celles de la proposition originale. Baddeley réfère d'ailleurs maintenant à ces fonctions comme étant trois fonctions exécutives de base (Hofmann, Schmeichel, & Baddeley, 2012).

Cette étude conduite par Miyake et ses collègues (2000) auprès de jeunes adultes a confirmé l'existence de trois FCA relativement indépendantes au sein de l'administrateur central : l'alternance (shifting), l'inhibition, et la mise à jour (updating). L'alternance désigne la capacité à accorder son attention de façon successive à différentes sous-tâches ou à différents éléments d'une même tâche (Monsell, 1996). Une telle opération entraîne ce qu'on appelle un coût de l'alternance, qui se traduit par une augmentation du temps de réponse et souvent par une augmentation du nombre d'erreurs (Monsell, 2003; Wasylshyn, Verhaeghen, & Sliwinski, 2011) dans un bloc d'essais nécessitant une alternance (coût global) ou sur les essais alternés (coût local). L'inhibition peut référer à différentes fonctions (Lustig, Hasher, & Zacks, 2007), mais désigne ici la capacité à freiner volontairement une réponse dominante ou automatique (Logan, 1994). La mise à jour permet quant à elle de modifier le contenu de la MdeT en cours d'exécution d'une tâche, en remplaçant les informations qui ne sont plus pertinentes par de nouvelles informations (Morris & Jones, 1990). Le choix de ces trois fonctions par Miyake et ses collaborateurs lors de l'élaboration de leur modèle repose sur le fait qu'elles sont fréquemment envisagées dans les modèles comme étant des fonctions exécutives de base (pour l'alternance : Baddeley, 1996a; Baddeley, Chincotta, & Adlam, 2001; pour l'inhibition : Baddeley, 1996a; Logan, 1985; Smith & Jonides, 1999; pour la mise à jour : Lehto, 1996). Ce choix a également été guidé par le fait qu'il s'agit de fonctions relativement circonscrites. De plus, il existe plusieurs tâches reconnues pour mesurer chacune de ces fonctions, ce qui facilite une évaluation valide et fiable de chacun de ces construits (Miyake et al.).

Pour valider leur modèle de façon empirique, Miyake et ses collaborateurs (2000) ont administré à un grand échantillon de jeunes adultes trois tâches mesurant chacune de ces trois fonctions. Une série d'analyses factorielles confirmatoires, comparant des modèles à un seul, deux, ou trois facteurs, a permis de montrer que les neuf tâches reflétaient effectivement trois variables latentes : l'alternance, l'inhibition et la mise à jour. En effet, bien qu'une corrélation modérée fût observée entre les différentes tâches, celles censées mesurer la même fonction étaient davantage corrélées entre elles qu'avec les tâches censées mesurer les autres fonctions. Le modèle à trois facteurs s'avérait ainsi le plus représentatif des données recueillies. De plus,

la variation sur l'une des fonctions n'expliquant qu'une partie modérée de la variation sur les autres fonctions, les auteurs ont conclu que les trois FCA étaient séparables. La présence de corrélations modérées entre les trois fonctions indique toutefois qu'elles sont associées d'une certaine façon. Bien que la nature de cette association reste à clarifier, les auteurs proposent qu'elle puisse refléter l'habileté à garder le but et les autres informations pertinentes pour la tâche en cours activés en MdeT (Engle, 2002; Engle et al., 1999; Miyake et al.).

Plusieurs études subséquentes ont apporté un appui empirique au modèle de Miyake, notamment en tentant d'identifier de façon plus précise jusqu'à quel point elles étaient séparables versus interreliées. Par exemple, il a été démontré que l'intelligence était fortement reliée à la mise à jour, mais pas à l'alternance, ni à l'inhibition (Friedman et al., 2006), appuyant ainsi leur caractère séparable. Par ailleurs, des études en neuroimagerie ont montré que la réalisation de tâches associées à chacune de ces trois fonctions activait des régions cérébrales communes, soit des réseaux impliquant à la fois des structures frontales et pariétales (Collette & Van der Linden, 2002). Ceci reflète probablement les processus attentionnels plus généraux auxquels fait référence Miyake (2000). Des activations spécifiques à chacune de ces fonctions ont également été observées (Collette & Van der Linden, 2002). Par exemple, en plus de dépendre de régions préfrontales et postérieures, l'alternance serait associée à des activations des noyaux gris centraux (Collette & Van der Linden, 2002; Ilkowska & Engle, 2010). L'inhibition serait quant à elle particulièrement associée à la région dorsolatérale du cortex préfrontal (Ilkowska & Engle, 2010). Comme on sait que le vieillissement s'accompagne de modifications structurales et fonctionnelles au niveau du cerveau (ex. : Raz & Rodrigue, 2006), il apparaît possible que la MdeT connaisse certains déclinés liés à l'âge. Ceci fera l'objet de la prochaine section.

## **1.2 Le vieillissement cognitif normal**

### **1.2.1 Vieillessement normal et mémoire de travail**

Dans le contexte du vieillissement de la population et de l'importance de la MdeT dans la vie de tous les jours, il est critique de s'intéresser à l'évolution avec l'âge de ce système cognitif. Parmi les composantes du modèle de Baddeley, l'administrateur central est celle sur laquelle l'âge aurait le plus d'impact (Baddeley, 1986). Une réduction globale des ressources

de l'administrateur central est généralement rapportée dans le vieillissement (Collette et al., 2007; Phillips & Hamilton, 2001). Il importe cependant de mentionner que des données divergentes sont rapportées en regard de ce déclin dans le vieillissement normal. Certaines études n'observent pas d'effet de l'âge dans des tâches classiques de MdeT qui font appel à l'administrateur central. En effet, l'âge aurait très peu (Lamar, Zonderman, & Resnick, 2002) ou pas d'impact (Belleville, Rouleau, & Caza, 1998) sur la performance à la tâche d'empan alphabétique. À l'opposé, des études ont documenté une diminution avec l'âge de la capacité à réaliser d'autres types de tâches classiques de MdeT (pour une revue, voir Collette & Van der Linden, 2005). Un effet délétère du vieillissement sur la performance à la tâche d'empan de phrases est rapporté de façon plutôt robuste dans la littérature (ex. : McCabe & Hartman, 2003; Meguro et al., 2000). De la même manière, des atteintes liées à l'âge ont été rapportées pour la procédure de Brown-Peterson (ex. : Floden, Stuss, & Craik, 2000; Inman & Parkinson, 1983), mais certaines études ont mis en évidence une absence d'effet d'âge (Belleville, Peretz, & Malenfant, 1996; Bherer, Belleville, & Peretz, 2001). En somme, des inconsistances sont observées dans la littérature quant à la nature des déclins de l'administrateur central dans le vieillissement, de même que leur ampleur (Phillips & Hamilton, 2001). Ces inconsistances pourraient s'expliquer, entre autres, par le fait que les études diffèrent quant aux procédures d'évaluation ou aux caractéristiques des participants. Une autre possibilité est que l'absence d'effet d'âge dans certaines études soit due à un manque de puissance statistique en raison de petites tailles d'échantillons. Enfin, il est également possible que les différentes tâches de MdeT, qui sont plutôt complexes, reposent sur des FCA qui diffèrent d'une tâche à l'autre, et sur lesquelles le vieillissement pourrait avoir un impact différentiel. Quoi qu'il en soit, la MdeT, ou du moins certaines de ses facettes, apparaissent sensibles aux effets du vieillissement.

Étant donné les effets du vieillissement sur le cerveau, il n'est pas surprenant que la MdeT subisse certains changements avec l'âge. Le vieillissement normal s'accompagne notamment d'une réduction du volume de certaines aires cérébrales (Raz & Kennedy, 2009; Walhovd et al., 2011). Les substrats cérébraux de la MdeT sont particulièrement vulnérables aux effets de l'âge. Il a effectivement été montré que le cortex préfrontal et le striatum sont les régions du cerveau connaissant la plus importante diminution de volume en vieillissant (Raz,

2000). Les lobes frontaux seraient d'ailleurs la structure cérébrale la plus vulnérable aux effets du vieillissement, tant au niveau morphologique que fonctionnel (Raz, Rodrigue, Kennedy, & Acker, 2007; West, 1996), et seraient la structure se détériorant le plus tôt et le plus rapidement au cours du vieillissement normal (Coffey et al., 1992; Coleman & Flood, 1987; Raz, Gunning-Dixon, Head, Dupuis, & Acker, 1998). De plus, Charlton et ses collègues (Charlton, Barrick, Lawes, Markus, & Morris, 2010) rapportent que l'intégrité des faisceaux fronto-pariétaux de matière blanche explique 20.3% de la variance en MdeT chez les personnes âgées. En plus de ces changements dans l'intégrité des structures cérébrales qui sous-tendent la MdeT, les personnes âgées saines présentent des changements dans les patrons d'activations. En effet, lorsqu'ils effectuent une tâche de MdeT, elles ont tendance à activer les régions préfrontales de façon plus importante que les jeunes adultes, ce qui est généralement interprété comme étant le reflet de phénomènes compensatoires. Ceci semble être le cas autant pour des tâches qui n'exigent que le maintien temporaire d'information que pour des tâches impliquant un maintien et un traitement simultanés d'informations (Reuter-Lorenz & Sylvester, 2005). Il n'est donc pas surprenant que le vieillissement normal soit associé à certains déclin de la MdeT (Collette et al., 2007). D'ailleurs, la théorie frontale du vieillissement cognitif (West, 1996) stipule que les déclin cognitifs liés à l'âge, tel que celui de la MdeT et des fonctions exécutives, résultent de modifications structurales et fonctionnelles à un niveau local, spécifiquement des modifications précoces et marquées du cortex préfrontal.

Outre la théorie frontale du vieillissement cognitif, d'autres approches théoriques peuvent expliquer le déclin de la MdeT avec l'âge. C'est notamment le cas de la théorie de la vitesse de traitement de l'information (Salthouse, 1996), selon laquelle la détérioration diffuse de la matière blanche cérébrale entraînerait un ralentissement de la vitesse à laquelle les traitements cognitifs de base sont effectués (Gunning-Dixon, Brickman, Cheng, & Alexopoulos, 2009; Madden, Bennett, & Song, 2009; Penke et al., 2010; Salami, Eriksson, Nilsson, & Nyberg, 2012). Ceci aurait notamment un effet délétère sur les processus de contrôle exécutif, affectant ainsi l'efficacité de la MdeT (Fisk & Warr, 1996; Salthouse & Babcock, 1991). Le support empirique à cette théorie provient surtout d'études ayant montré que le fait de contrôler pour la vitesse de traitement de l'information réduit, ou même élimine

dans certains cas, les différences liées à l'âge pour diverses fonctions cognitives, dont la MdeT (Salthouse, 1992; Salthouse & Babcock, 1991; Salthouse, Babcock, & Shaw, 1991; Salthouse & Meinz, 1995). Cependant, bien qu'il puisse expliquer plusieurs déclin, le ralentissement cognitif ne saurait rendre compte à lui seul de l'ensemble des déficits cognitifs observés dans le vieillissement (Verhaeghen & Salthouse, 1997). Il a par exemple été démontré que le déclin des fonctions exécutives (comme l'alternance et l'inhibition) associé à l'âge persiste après avoir statistiquement contrôlé pour l'effet du ralentissement cognitif (Keys & White, 2000).

Par ailleurs, la théorie du déclin des mécanismes d'inhibition (Hasher & Zacks, 1988) peut elle aussi rendre compte des déclin de certaines mesures de MdeT associés au vieillissement. Selon cette théorie, la réalisation efficace d'une tâche de MdeT nécessite de focaliser son attention sur les informations pertinentes, d'ignorer les informations non pertinentes, et de désactiver rapidement les informations qui étaient pertinentes mais qui ne le sont plus. Le vieillissement normal aurait un effet délétère sur les mécanismes inhibiteurs. En limitant donc moins efficacement l'activation des informations en MdeT à celles qui sont pertinentes pour la tâche en cours, la MdeT se trouverait « encombrée » d'une certaine quantité d'informations non pertinentes. La quantité d'attention pouvant être accordée aux informations pertinentes serait, par le fait même, diminuée. L'efficacité pour la réalisation de la tâche serait alors moindre. En lien avec cette théorie, une étude d'imagerie cérébrale fonctionnelle a montré que les personnes âgées ont de la difficulté à supprimer l'activité corticale associée aux représentations non pertinentes à la tâche. Dans cette étude, le déficit spécifique à la suppression est corrélé à l'efficacité de la MdeT, ce que les auteurs interprètent comme signifiant qu'il est à l'origine des déclin de la MdeT liés à l'âge (Gazzaley, Cooney, Rissman, & D'Esposito, 2005).

Selon certains, le déclin avec l'âge de la MdeT et de ses fonctions exécutives aurait un impact général sur le fonctionnement cognitif, du moins sur les aspects fluides de la cognition (Baddeley, 1986; Braver & West, 2008; Salthouse & Babcock, 1991). Par exemple, une altération de la MdeT aurait un impact sur la mémoire épisodique (Park et al., 1996; Troyer, Graves, & Cullum, 1994), la mémoire prospective (McDaniel, Glisky, Rubin, Guynn, & Routhieaux, 1999; Salthouse, Berish, & Siedlecki, 2004; West & Craik, 2001), de même que



sur les activités de la vie quotidienne (Royall, Palmer, Chiodo, & Polk, 2004). Cet impact plus général sur la cognition résulterait de la réduction des ressources cognitives disponibles pour le maintien temporaire d'informations nouvelles pendant qu'une opération mentale est effectuée sur une autre information (Baddeley, 1986). Cette proposition théorique est notamment appuyée par une étude de Salthouse, Atkinson et Berish (2003), dans laquelle le fait de contrôler statistiquement pour le fonctionnement exécutif (qui inclut l'inhibition, la mise à jour en MdeT, et le « time sharing ») réduit significativement l'ampleur des déclinés liés à l'âge pour plusieurs habiletés cognitives. Il n'existe cependant pas de consensus à savoir si ce déclin de la MdeT est à l'origine du déclin des autres fonctions cognitives ou s'il est, par exemple, secondaire aux autres modifications accompagnant le vieillissement. Il pourrait effectivement s'agir d'un déclin qui est à la base des autres déclinés cognitifs associés au vieillissement. Il est également possible qu'il soit la conséquence de l'altération des structures frontales comme le postule la théorie frontale du vieillissement cognitif, ou encore que la capacité de la MdeT soit un médiateur de la relation entre la vitesse ou l'inhibition et le fonctionnement cognitif (Van der Linden et al., 1999).

Quoi qu'il en soit, la plupart des auteurs sont d'avis que la vitesse de traitement, l'inhibition et la MdeT constituent trois indices interdépendants de l'efficacité des traitements cognitifs. La contribution relative de chacun à l'efficacité des habiletés cognitives de plus haut niveau pourrait en fait dépendre du type de tâche cognitive ou du type d'information sur laquelle la tâche cognitive est effectuée (pour une revue, voir Van der Linden et al., 1999). D'ailleurs, le fait que les tâches utilisées pour mesurer la MdeT varient beaucoup à travers les études pourrait être à l'origine des inconsistances observées dans la littérature quant à l'impact du vieillissement sur la MdeT (Baddeley, 1996a). Il est notamment possible que diverses tâches de MdeT impliquent des FCA plus fines qui diffèrent selon la tâche (Collette et al., 2007; Conway et al., 2005). Ces FCA pourraient être différentiellement affectées par le vieillissement. Ainsi, les tâches de MdeT reposant sur une ou des FCA atteinte(s) pourraient être davantage atteintes en vieillissant. Dans cet ordre d'idées, si le modèle de fractionnement du contrôle attentionnel validé par Miyake et ses collaborateurs (2000) auprès de jeunes adultes s'applique également au vieillissement normal, la séparabilité des fonctions postulées

pourrait permettre d'expliquer certaines des inconsistances relevées dans la littérature quant à l'impact de l'âge sur la MdeT.

### **1.2.2 Vieillessement normal et fonctions de contrôle attentionnel**

L'étude de l'impact du vieillissement sur les FCA qui sous-tendent la MdeT pourrait permettre une intégration des résultats rapportés ci-haut, qui semblent à première vue divergents. Le vieillissement pourrait avoir un impact sur certaines de ces fonctions, qui pourrait se répercuter sur la réalisation de tâches cognitives complexes telles que celles mesurant la MdeT (Horn, 1986). Pour évaluer l'impact du vieillissement normal sur les FCA proposées par Miyake et al. (2000), soit l'alternance, l'inhibition et la mise à jour, plusieurs chercheurs ont fait appel à un petit nombre de participants et de tâches dans lesquelles on manipule certains paramètres pour mettre en évidence ces processus cognitifs fins. Ces travaux visent à distinguer les fonctions qui sont atteintes de celles qui sont préservées dans le vieillissement normal (ex. : Belleville et al., 1998; Hasher, Stoltzfus, Zacks, & Rypma, 1991; Van der Linden, Bredart, & Beerten, 1994). Les prochains paragraphes présenteront un résumé des travaux ayant porté sur l'inhibition, l'alternance, et la mise à jour.

***Inhibition.*** L'inhibition est particulièrement atteinte dans le vieillissement. Un effet délétère du vieillissement normal sur les processus inhibiteurs est rapporté de façon assez constante dans la littérature (ex. : Baddeley, 1996a; Butler, Zacks, & Henderson, 1999; Etienne, Marin-Lamellet, & Laurent, 2008; Hasher & Zacks, 1988; Van der Linden, Beerten, & Pesenti, 1998; Wecker, Kramer, Wisniewski, Delis, & Kaplan, 2000). Cette fonction déclinerait d'ailleurs plus tôt dans le vieillissement que l'alternance ou d'autres fonctions dites exécutives (Jurado & Rosselli, 2007). Ce déclin des mécanismes inhibiteurs est à la base de certaines théories du vieillissement cognitif (Hasher & Zacks, 1988). L'effet de l'âge sur l'inhibition demeurerait après avoir contrôlé pour l'intelligence ou pour le ralentissement général (Andres & Van der Linden, 2000; Baddeley, 1996a). Certaines études ont cependant mis en évidence une préservation des mécanismes inhibiteurs dans le vieillissement (ex. : Eenshuistra, Ridderinkhof, & van der Molen, 2004; Kieley & Hartley, 1997; Rouleau & Belleville, 1996; Verhaeghen, 2011; Verhaeghen & Cerella, 2002; Verhaeghen & De Meersman, 1998). Ces divergences dans la littérature pourraient provenir du fait que tous les

types de processus inhibiteurs ne sont pas affectés de la même façon par le vieillissement (Collette et al., 2007; Rouleau & Belleville, 1996). Les changements dans l'inhibition avec le vieillissement varieraient selon des caractéristiques spécifiques à chaque tâche (Feyereisen & Charlot, 2008). Par exemple, les processus volontaires d'inhibition déclineraient avec l'âge, tandis que ceux qui sont davantage automatiques seraient préservés (Collette, Germain, Hogge, & Van der Linden, 2009; Kramer, Humphrey, Larish, Logan, & Strayer, 1994; Sweeney, Rosano, Berman, & Luna, 2001).

*Alternance.* De nombreuses études se sont penchées sur l'effet de l'âge sur les capacités d'alternance et ces études ont mené à des résultats divergents. En effet, certaines ont montré une atteinte de l'alternance dans le vieillissement (Georgiou-Karistianis et al., 2006; Salthouse, Fristoe, McGuthry, & Hambrick, 1998; Wecker, Kramer, Hallam, & Delis, 2005) alors que d'autres ont noté des capacités d'alternance équivalentes (Etienne et al., 2008; Lien, Ruthruff, & Kuhns, 2008; Verhaeghen & Basak, 2005; Wecker et al., 2000; West & Travers, 2008), voire même supérieures sous certaines conditions chez les participants âgés que chez les jeunes adultes (Kray, 2006). Une partie de cette divergence pourrait s'expliquer par le type de mesure utilisée pour juger des capacités d'alternance. En effet, le coût de l'alternance peut être mesuré d'un point de vue global ou local. Le coût global réfère à l'augmentation du temps de réponse associée au fait d'être dans une condition (ou un bloc d'essais) où deux opérations mentales doivent être effectuées en alternance, comparativement à une condition où une seule des opérations est effectuée. Une telle mesure refléterait le coût associé à la préparation et au maintien simultané de deux opérations mentales en MdeT (Kray & Lindenberger, 2000). Le coût local réfère quant à lui à l'augmentation du temps de réponse associée aux essais pour lesquels une alternance doit être effectuée, comparativement aux essais ne requérant pas d'alternance, à l'intérieur d'un même bloc d'essais. Cette mesure refléterait les processus exécutifs requis pour la désactivation de l'opération mentale effectuée lors de l'essai précédent et l'activation de l'opération mentale requise pour l'essai en cours (Monsell, 2003). Dans une récente méta-analyse, Wasylyshyn, Verhaeghen et Sliwinski (2011) concluent que les personnes âgées sont atteintes au niveau du coût global de l'alternance, alors que le coût local ne serait pas sensible aux effets du vieillissement. De nombreux autres auteurs arrivent à cette même conclusion (Kray, Li, & Lindenberger, 2002; Verhaeghen, 2011; Verhaeghen &

Cerella, 2002), même si l'on recense certaines études ayant rapporté une atteinte du coût local de l'alternance dans le vieillissement (Kray et al., 2002; Meiran, Gotler, & Perlman, 2001). Enfin, les difficultés d'alternance des personnes âgées pourraient se refléter davantage dans la quantité d'erreurs qu'ils commettent plutôt que dans le coût en vitesse associé au fait d'alterner l'attention (Verhaeghen & Basak, 2005).

**Mise à jour.** On connaît moins bien les effets du vieillissement sur la mise à jour que sur l'alternance ou l'inhibition. Certaines études montrent des capacités de mise à jour plus faibles chez les personnes âgées comparativement aux jeunes adultes (De Beni & Palladino, 2004; Dobbs & Rule, 1989; Etienne et al., 2008; Van der Linden et al., 1994), et ces différences ne seraient pas entièrement attribuables au ralentissement (Collette et al., 2007). De plus, une étude récente montre que des changements dans les activations de certaines régions cérébrales sont associés au déclin des habiletés de mise à jour chez les personnes âgées (Podell et al., 2012). D'autres études n'ont cependant pas noté de déclin lié à l'âge quant aux habiletés de mise à jour (Radvansky, Copeland, Berish, & Dijkstra, 2003; Verhaeghen & Basak, 2005).

En résumé, les études présentées ci-haut ont engendré des résultats contradictoires. Le déclin de l'inhibition avec l'âge semble assez clair, mais les études ne permettent pas de tirer des conclusions définitives quant à l'impact du vieillissement normal sur l'alternance et la mise à jour. Ces divergences pourraient s'expliquer par un manque de puissance statistique, par des différences dans les caractéristiques des participants, ainsi que, dans certains cas, par la contribution de facteurs généraux comme la vitesse de traitement. Qui plus est, la plupart des études se basent sur une seule mesure et celle-ci varie grandement d'une étude à l'autre. Or, en plus de mesurer la FCA ciblée, une tâche spécifique met en jeu un ensemble de processus cognitifs non exécutifs, qui varient d'une tâche à l'autre. Ceci pourrait expliquer une partie des différences dans les résultats. Tel que décrit dans les paragraphes suivants, des études ayant eu recours à des analyses factorielles ont été en mesure de pallier à ce type de limites.

En administrant à de grands groupes de participants plusieurs tâches mesurant chacune des FCA, des études factorielles permettent non seulement d'examiner l'impact du vieillissement sur les FCA, mais également de déterminer si la structure à trois facteurs (alternance, inhibition et mise à jour) proposée par Miyake et ses collaborateurs (2000) est présente chez les personnes âgées. Cet aspect sera d'abord abordé dans cette section.

Des études ont notamment cherché à déterminer si le modèle de contrôle attentionnel proposé par Miyake et al. (2000) s'appliquait également dans le vieillissement. La structure à trois facteurs (alternance, inhibition et mise à jour) proposée par Miyake et ses collaborateurs a été retrouvée chez des personnes âgées normales (Vaughan & Giovanello, 2010) et chez des personnes âgées relativement performantes sur le plan cognitif (De Frias, Dixon, & Strauss, 2009). Une structure très similaire a également été observée chez un groupe d'adultes âgés de 20 à 81 ans par Fisk & Sharp (2004). Ces derniers ont rapporté que l'alternance, l'inhibition et la mise à jour constituent bel et bien des FCA séparables au sein de l'administrateur central. Ils ont toutefois identifié l'accès à la mémoire à long terme comme constituant une quatrième FCA. Ces différentes études montrent donc qu'une structure identique ou très similaire à celle trouvée par Miyake et al. auprès de jeunes adultes peut également être observée chez des personnes âgées.

Il importe toutefois de mentionner que quelques études utilisant une telle approche factorielle auprès de personnes âgées n'ont retrouvé la structure de Miyake et al. (2000) que de façon partielle. Par exemple, Hull et ses collaborateurs (Hull, Martin, Beier, Lane, & Hamilton, 2008) ont identifié l'alternance et la mise à jour comme étant deux fonctions séparables, mais leur analyse n'a pas permis d'identifier l'inhibition comme troisième facteur séparable. Par contre, d'importantes différences dans les tâches utilisées semblent pouvoir être à l'origine de ces différences dans les structures factorielles observées. En revanche, Hedden et Yoon (2006) ont observé que l'inhibition constituait bel et bien une fonction de contrôle attentionnel séparable de l'alternance et de la mise à jour, leur analyse ayant par contre regroupé ces deux dernières fonctions en un seul facteur. Dans cette étude, l'utilisation de tâches exécutives relativement complexes (telle que le Wisconsin Card Sorting Test) pour mesurer l'alternance peut avoir réduit la variance unique associée à l'alternance, expliquant

ainsi potentiellement les chevauchements entre cette fonction et la mise à jour dans leur modèle. Dans le même ordre d'idées, Adrover-Roig et ses collègues (Adrover-Roig, Sese, Barcelo, & Palmer, 2012) ont identifié un modèle à deux facteurs, soient l'accès à la mémoire à long terme et la MdeT (facteur qui englobe l'alternance, l'inhibition et la mise à jour), pour rendre compte des performances de personnes âgées de 48 à 92 ans à une série de tâches dites exécutives. Toutefois, encore ici, l'étude fait appel à des tâches plus complexes que l'étude de Miyake et al. Par exemple, la tâche de Brixton ainsi qu'une variante du Wisconsin Card Sorting Test sont utilisées comme mesures d'alternance. Bien que ces tâches comportent sans contredit une composante d'alternance, elles font également intervenir une panoplie d'autres processus cognitifs. Ceci contribue fort probablement au fait qu'elles partagent beaucoup de variance commune avec les autres tâches à l'étude, et qu'un seul facteur « MdeT » (englobant l'alternance, l'inhibition et la mise à jour) ait émergé de leur analyse factorielle. Enfin, De Frias et collaborateurs (de Frias, Dixon, & Strauss, 2006) ont administré à des personnes âgées deux tâches d'alternance et deux tâches d'inhibition et ont trouvé qu'un facteur unique rendait compte de la variance à ces tâches exécutives. L'absence de mesures de mise à jour dans leur étude limite cependant les conclusions qui peuvent en être tirées quant à l'unité ou à la diversité des processus exécutifs identifiés par Miyake et al. (2000). Il s'agit d'ailleurs d'une des rares études appuyant l'idée d'un caractère unitaire des processus exécutifs.

Bref, la plupart des études s'étant penchées sur l'aspect unitaire versus diversifié des fonctions exécutives chez les personnes âgées arrivent à la conclusion qu'elles sont séparables en diverses FCA relativement indépendantes. La majorité de ces études semblent cohérentes, en partie du moins, avec la structure proposée par Miyake et ses collaborateurs (2000).

Parmi les études factorielles relatées ci-dessus, seulement deux ont évalué directement l'effet de l'âge sur les FCA. Fisk et Sharp (2004) ont trouvé que l'âge expliquait 15 à 20% de la variance dans l'alternance, l'inhibition et la mise à jour. Après avoir contrôlé pour la vitesse de traitement, l'effet de l'âge ne demeurait significatif que pour l'alternance. De la même manière, Adrover-Roig et ses collaborateurs (2012) notent que la vitesse de traitement est un puissant médiateur pour l'effet de l'âge sur les FCA qu'ils ont identifiées. Ils spécifient

toutefois que leurs mesures de vitesse impliquaient certains processus exécutifs, ce qui peut avoir contribué à l'ampleur de l'effet médiateur observé.

En somme, les études ayant utilisé des analyses factorielles chez de grands groupes de personnes âgées portent à croire que les fonctions exécutives reposent sur des FCA relativement indépendantes, dont la structure serait très similaire à celle observée par Miyake et ses collègues (2000) chez les jeunes adultes. Parmi ces études, seules celle de Fisk et Sharp (2004) et celle d'Adrover-Roig et collaborateurs (2012) se sont penchées sur l'impact du vieillissement sur les FCA. Par contre, d'importantes différences existent entre ces études et celle de Miyake et al., tant au niveau méthodologique que dans la structure factorielle obtenue. Il s'avère donc impossible, à ce stade, de conclure sur l'effet de l'âge sur les FCA définies dans le modèle de Miyake et al. Pour ce faire, il conviendrait d'administrer, à la fois à un groupe de jeunes adultes et un groupe de personnes âgées, des tâches très similaires à celles utilisées par Miyake et al. Ceci permettrait de comparer directement l'impact de l'âge sur les trois FCA, au sein d'un même échantillon de jeunes adultes et de personnes âgées. Ces objectifs feront partie de la première étude de cette thèse.

### **1.3 Contribution des fonctions de contrôle attentionnel à des tâches complexes**

Tel que mentionné précédemment, il est envisageable que les inconsistances relevées dans la littérature quant à l'impact du vieillissement sur la MdeT proviennent du fait que les différentes tâches utilisées pour mesurer la MdeT reposent sur des FCA différentes, sur lesquelles le vieillissement normal pourrait avoir un impact différentiel. Afin de statuer sur l'atteinte ou l'intégrité de la MdeT dans le vieillissement, il apparaît donc crucial de s'interroger sur les processus cognitifs plus fins, notamment les FCA, qui sous-tendent la réalisation des diverses tâches de MdeT.

L'un des aspects intéressants de l'étude de Miyake et collaborateurs (2000) décrite plus haut a été d'évaluer la contribution de ces trois FCA à la réalisation de tâches exécutives utilisées couramment en neuropsychologie clinique (Wisconsin Card Sorting Test, Tour de Hanoi, génération aléatoire de nombres, empan d'opérations et paradigme de la double tâche). Pour chacune de ces tâches, une série d'analyses par équations structurales a permis de

comparer différents modèles afin de déterminer quelles FCA (alternance, inhibition, et mise à jour) permettaient d'expliquer la performance. Les auteurs ont ainsi observé que la contribution des FCA variait selon la tâche. En effet, la performance au Wisconsin Card Sorting Test était déterminée par les habiletés d'alternance, la performance à la Tour de Hanoi par l'inhibition, la génération aléatoire de nombres par l'inhibition et la mise à jour, et l'empan d'opérations par la mise à jour. La variabilité des performances à la double tâche n'était, quant à elle, expliquée par aucune des trois FCA. Ces résultats ont plusieurs implications importantes. D'une part, ils fournissent un appui supplémentaire à la proposition selon laquelle les trois fonctions sont relativement indépendantes, puisque si elles représentaient un construit unitaire, elles seraient toutes impliquées au même degré dans la réalisation d'une tâche donnée. D'autre part, ces résultats suggèrent que les tâches exécutives complexes ne sont pas interchangeables, en ce sens que ces différentes tâches varient quant aux FCA qu'elles sollicitent et donc, qu'elles mesurent. Comme les fonctions exécutives et la MdeT partagent beaucoup de variance commune (Engle, 2002; McCabe, Roediger, McDaniel, Balota, & Hambrick, 2010), il est pertinent de se questionner sur l'implication relative des FCA dans des tâches de MdeT couramment utilisées.

En recherche comme en neuropsychologie clinique, la MdeT est évaluée à l'aide de tâches diverses qui nécessitent un maintien actif de l'information en mémoire. Les tâches d'empan complexe, telles que l'empan de phrases ou l'empan de calculs, sont reconnues comme étant des mesures particulièrement fidèles et valides de la MdeT (Conway et al., 2005). Par exemple, une des multiples variantes de la tâche d'empan de phrases exige d'émettre un jugement sur la plausibilité d'une série de phrases tout en gardant en mémoire le dernier mot de chaque phrase. La procédure de Brown-Peterson (Brown, 1958; Peterson & Peterson, 1959), nécessitant le maintien d'une petite quantité d'information en mémoire pendant qu'une tâche interférente est exécutée, constitue une autre mesure classique de la MdeT. La tâche d'empan alphabétique (Craik, 1986), laquelle exige de rappeler une série de mots dans l'ordre alphabétique plutôt que dans l'ordre de présentation, peut également être utilisée pour évaluer la MdeT. Ces différentes tâches dites « de MdeT » sont souvent utilisées de façon interchangeable en recherche et en clinique comme si elles mesuraient toutes le même construit, ce qui pourrait ne pas être le cas. Il est vrai qu'elles ont comme point



commun de nécessiter qu'une petite quantité d'information soit maintenue, pendant l'exécution d'un traitement cognitif quelconque (Conway et al., 2005). Cependant, ces tâches étant aussi complexes que les tâches exécutives auxquelles Miyake et ses collaborateurs (2000) se sont intéressés, il est envisageable qu'elles diffèrent quant à la contribution relative des FCA.

Plusieurs indications portent à croire que différentes FCA pourraient effectivement intervenir dans la réalisation de ces tâches complexes de MdeT. Par exemple, il a été proposé que lors de la réalisation d'une tâche d'empan complexe, les enfants (Towse, Hitch, & Hutton, 1998) et les adultes (Lépine, Bernardin, & Barouillet, 2005; Towse, Hitch, & Hutton, 2000) maintiennent les items en mémoire en alternant rapidement leur attention entre le maintien et le traitement pendant qu'ils effectuent la tâche concurrente. Unsworth et Engle (2008) notent cependant que l'empan complexe n'est associé à l'alternance que lorsque des mesures d'exactitude de la réponse sont utilisées, tandis que ce n'est pas le cas avec des mesures de coût de l'alternance. D'autres auteurs voient plutôt la performance à des tâches d'empan complexe comme reflétant les habiletés d'inhibition. Selon cette vision, les processus inhibiteurs seraient nécessaires pour contrer les effets de l'interférence proactive. La récupération des réponses correctes, dans ce contexte où les réponses des essais précédents entrent en compétition, nécessiterait une inhibition de ces réponses qui ne sont plus pertinentes (Lustig, May, & Hasher, 2001; Unsworth & Engle, 2007). Des manipulations expérimentales ont montré que le fait de réduire la quantité d'interférence proactive améliore effectivement la performance à ce type de tâche, et que ceci est vrai pour les jeunes adultes et pour les personnes âgées (May, Hasher, & Kane, 1999). Enfin, la mise à jour est également liée à la MdeT, comme en témoignent les corrélations significatives mises en lumière par Lehto (Lehto, 1996) entre cette FCA et cinq mesures d'empan complexe, dont une tâche d'empan de phrases.

En somme, sur la base de la littérature, l'alternance, l'inhibition et la mise à jour semblent toutes trois pouvoir contribuer à la réalisation de tâches de MdeT. Toutefois, les études n'ont le plus souvent porté que sur les tâches d'empan complexe. De plus, aucune étude n'a évalué, à l'intérieur d'une même analyse, la contribution relative de ces trois FCA aux

tâches de MdeT. En ne portant que sur une seule fonction de contrôle attentionnel, ces études ne prennent pas en considération la variance commune que partagent les trois FCA (Miyake et al., 2000). Il est par exemple possible que la contribution de l'inhibition provienne en fait de la variance commune qu'elle partage avec la mise à jour. Des analyses de régressions multiples pourraient permettre de statuer sur l'implication spécifique de chacune de ces fonctions dans différentes tâches complexes de MdeT. Ces analyses permettent en effet d'examiner la partie unique de la variance dans la performance à une tâche complexe de MdeT qui est expliquée par chaque FCA. C'est donc une approche qui sera favorisée dans la première étude.

En outre, il est important d'examiner de façon systématique la contribution spécifique de la vitesse de traitement à la performance sur les tâches complexes de MdeT. Il a en effet été montré que les différences individuelles au niveau de la vitesse de traitement ont un effet direct sur la capacité de la MdeT des personnes jeunes (Fry & Hale, 1996; mais voir Redick, Unsworth, Kelly & Engle, 2012). De la même manière, le fait de contrôler pour la vitesse de traitement atténue une grande partie des déclin de la MdeT associés au vieillissement (Salthouse, 1992). Le cadre théorique le plus souvent utilisé pour rendre compte de ces effets est celui élaboré par Salthouse (1996). Selon cette approche, les activités cognitives complexes telles que les tâches de MdeT sont décomposables en une série d'étapes qui doivent être effectuées de façon séquentielle. Pendant qu'une étape est réalisée, les sous-produits des étapes précédentes doivent être maintenus en MdeT. Un individu traitant l'information lentement aura de la difficulté à effectuer une étape dans un délai assez rapide pour que les sous-produits des étapes précédentes soient toujours activés. Ce mécanisme, que Salthouse qualifie de mécanisme de simultanité, interviendrait de façon particulièrement importante dans les épreuves d'empan complexe. Il est donc critique de s'intéresser à ce facteur dans le contexte de cette thèse, étant donné le ralentissement cognitif associé au vieillissement.

En somme, la réalisation de tâches complexes de MdeT semble dépendre d'un ensemble de FCA et/ou de la vitesse de traitement. À l'heure actuelle, la littérature ne permet pas de déterminer la contribution exacte de ces processus dans la réalisation de diverses tâches de MdeT, ni de savoir si toutes les tâches de MdeT font intervenir la même combinaison de processus. Elle ne permet pas non plus de connaître les effets du vieillissement sur la

contribution de ces facteurs à la réalisation des tâches de MdeT. Or, une meilleure caractérisation des processus fins impliqués dans la réalisation de ces tâches pourrait permettre d'expliquer les effets différentiels du vieillissement sur elles, le cas échéant. Il paraît aussi important d'examiner si les jeunes adultes et les personnes âgées ont recours aux mêmes processus pour effectuer une tâche complexe donnée.

### **1.3.1 Effet du vieillissement**

Certains résultats suggèrent que le vieillissement normal pourrait entraîner une modification des fonctions contribuant à la réalisation de tâches complexes. Ainsi, Hull et al. (2008) ont voulu examiner si les FCA auxquelles les personnes âgées font appel pour la réalisation de deux tâches exécutives complexes (la Tour de Hanoi et le Wisconsin Card Sorting Test) sont les mêmes que celles qu'avaient observées Miyake et al. (2000) chez de jeunes adultes. Leurs résultats indiquent que la variance des performances des personnes âgées à ces deux tâches est expliquée par la mise à jour. Ceci diffère des résultats obtenus par Miyake et al. auprès de jeunes adultes, qui montraient que la performance à la Tour de Hanoi était associée à l'inhibition, tandis que la performance au Wisconsin Card Sorting Test était associée à l'alternance. De façon similaire, Lehto (1996) a montré que la mise à jour n'est pas liée à la performance au Wisconsin Card Sorting Test chez des adolescents. Mis ensemble, les résultats de ces études suggèrent que la performance à des tâches cognitives complexes est sous-tendue par des FCA différentes chez des jeunes adultes et chez des adultes âgés, ces derniers ayant davantage recours à la mise à jour. Il est probable que ce plus grand recours à la mise à jour soit dû au fait que cette FCA est relativement préservée dans le vieillissement. Il importe toutefois de souligner que cette comparaison porte sur des études différentes. La comparaison d'un groupe d'âgés à un groupe de jeunes faisant partie d'études différentes peut être problématique puisque les études varient à différents niveaux, comme la source et le mode de recrutement, l'origine des participants et le type de protocole. Néanmoins, la comparaison de leurs résultats suggère des modifications avec l'âge quant aux FCA qui sont sous-jacentes à la réalisation de tâches cognitives complexes. Toutefois, à ce jour, aucune étude n'a évalué directement si les FCA contribuaient différemment à la réalisation de tâches complexes de MdeT chez des personnes âgées versus de jeunes adultes. Cet objectif sera donc poursuivi dans la première étude de cette thèse. Si les âgés sollicitent des FCA qui sont atteintes dans le

vieillessement (ex. : l'inhibition) pour effectuer une tâche de MdeT, il est probable que leur performance à cette tâche soit atteinte. En revanche, s'ils tentent de compenser pour le déclin de certaines habiletés en ayant recours à des FCA plutôt préservées dans le vieillissement, il est envisageable qu'ils arrivent à performer aussi bien que des jeunes adultes.

## **1.4 Variabilité interindividuelle**

### **1.4.1 Variabilité interindividuelle et vieillissement cognitif normal**

L'étude du vieillissement normal prend habituellement la forme d'une comparaison entre un groupe de personnes jeunes et un groupe de personnes âgées, en axant sur les effets de groupe et en n'examinant pas la présence ou la nature de la variabilité des performances à l'intérieur d'un même groupe d'âge (Rowe & Kahn, 1987). Sur la base des moyennes de groupes, on observe certes un déclin des fonctions cognitives avec l'âge. Toutefois, un examen des patrons individuels de performance révèle une très grande hétérogénéité entre les individus (Ylikoski et al., 1999). Ces différences interindividuelles peuvent toucher l'ensemble des fonctions cognitives (Nelson & Dannefer, 1992). Les personnes peuvent aussi différer quant aux domaines cognitifs pour lesquels ils présentent des forces ou des faiblesses (Schretlen, Munro, Anthony, & Pearlson, 2003; Ska & Joannette, 2006). Un individu peut ainsi avoir une grande facilité à réaliser un type de tâche, tout en présentant d'importantes difficultés à réaliser un autre type de tâche. La présence de telles différences intra-individuelles est un phénomène connu et réfère à la notion de dispersion (Christensen et al., 1999; Hilborn, Strauss, Hultsch, & Hunter, 2009).

Il a été montré que la variabilité interindividuelle augmente avec l'âge, tant pour les fonctions cognitives que physiologiques (Nelson & Dannefer, 1992; Rowe & Kahn, 1987). Cette augmentation de la variabilité interindividuelle avec l'âge ne serait cependant pas équivalente à travers l'ensemble des fonctions cognitives (Christensen et al., 1994). En effet, les études ont rapporté davantage de variation entre les individus pour la mémoire (Christensen et al., 1994, 1999), le fonctionnement spatial et la vitesse de traitement (Christensen et al., 1999), ainsi que pour l'intelligence fluide (Christensen et al., 1994). Par contre, la variabilité interindividuelle dans les mesures d'intelligence cristallisée semble rester stable dans le vieillissement (Christensen et al., 1994, 1999). Dans le même sens, plusieurs

études rapportent que la variabilité intra-individuelle, ou dispersion, augmente avec l'âge pour ce qui est des fonctions cognitives (Christensen et al., 1999; Hilborn et al., 2009; Hulstsch, MacDonald, & Dixon, 2002; Rabbitt, 1993; Schretlen et al., 2003; mais voir Lindenberger & Baltes, 1997; Rapp, Schnaider-Beeri, Sano, Silverman, & Haroutunian, 2005). Ceci signifie que les performances d'un individu à travers différentes fonctions cognitives ont tendance à devenir de plus en plus hétérogènes avec l'âge.

La présence de cette variabilité suggère qu'il est possible d'identifier des sous-groupes d'individus présentant différents patrons de forces/faiblesses, particulièrement chez les personnes plus âgées (Christensen, 2001; Rabbitt, 1993; Valdois, Joannette, Poissant, Ska, & Dehaut, 1990). Les analyses hiérarchiques en grappes (cluster analysis) sont utiles pour examiner la variabilité interindividuelle, puisqu'elles permettent d'identifier des sous-groupes d'individus au sein d'un échantillon, en maximisant la similarité entre les individus à l'intérieur d'un sous-groupe et en maximisant les différences entre les sous-groupes distincts (Aldenderfer & Blashfield, 1984). Les études ayant employé ce type d'analyses dans le domaine du vieillissement cognitif ont mis en évidence l'existence de différents sous-groupes de personnes âgées, sur la base de leurs performances à des épreuves évaluant les grands domaines cognitifs : langage, mémoire, habiletés visuo-constructives, vitesse de traitement, fonctions exécutives et attention (Gunstad et al., 2006; Hilborn et al., 2009; Mitrushina, Uchiyama, & Satz, 1995; Valdois et al., 1990; Ylikoski et al., 1999).

La plupart de ces études ont pu opposer un sous-groupe d'individus dont les performances se situent très au-dessus de la moyenne de leur échantillon, à un sous-groupe d'individus dont les performances sont globalement très atteintes (Hilborn et al., 2009; Mitrushina et al., 1995; Valdois et al., 1990; Ylikoski et al., 1999; mais voir Gunstad et al., 2006). Ces études ont aussi mis en évidence au moins un sous-groupe de personnes âgées présentant des différences intra-individuelles sur le plan de leurs forces/faiblesses au travers des différents domaines cognitifs. Un profil fréquemment rapporté se caractérise par une faiblesse relative dans les tâches impliquant l'organisation visuospatiale, par exemple la reproduction de modèles complexes par le dessin ou à l'aide de blocs (Mitrushina et al., 1995; Valdois et al., 1990; Ylikoski et al., 1999), ou les fonctions exécutives (Gunstad et al., 2006).

Ces résultats portent à croire que le domaine exécutif pourrait être particulièrement propice à l'émergence de différences interindividuelles.

#### **1.4.2 Variabilité interindividuelle et les fonctions de contrôle attentionnel**

Les études mentionnées ci-haut indiquent la présence, chez les personnes âgées, de différences inter- et intra-individuelles pour les grands domaines de la cognition. Elles indiquent que les personnes âgées peuvent être regroupées en quelques sous-groupes présentant des profils cognitifs distincts. Le domaine exécutif paraît particulièrement sensible aux différences interindividuelles. Or, comme nous l'avons montré dans les sections précédentes, ce domaine est sous-tendu par des processus de contrôle attentionnel fins, pour lesquels des différences entre les individus pourraient également être observées. La MdeT est également connue pour être très variable d'un individu à l'autre (Unsworth & Engle, 2007), et cette variabilité interindividuelle serait le reflet de différences dans l'efficacité du contrôle attentionnel (Engle et al., 1999; Kane, Conway, Hambrick, & Engle, 2007). À ce jour, aucune étude n'a examiné la variabilité interindividuelle dans les FCA qui sous-tendent les fonctions exécutives et la MdeT.

L'alternance, l'inhibition et la mise à jour étant des FCA relativement indépendantes, il est justifié de s'attendre à ce que différents profils de contrôle attentionnel soient présents au sein d'un échantillon d'adultes jeunes ou âgés. Parmi ces trois fonctions, il est envisageable que l'inhibition soit une variable critique permettant de distinguer entre les différents profils de contrôle attentionnel des personnes âgées. Il a en effet été proposé que les variations interindividuelles au niveau des processus inhibiteurs sont à l'origine des différences individuelles au niveau d'une grande variété d'activités cognitives complexes, dont la MdeT (Engle, 2002; L. Hasher, Lustig, & Zacks, 2007; Kane et al., 2007; Lustig et al., 2001; mais voir McCabe & Hartman, 2003). De plus, l'inhibition est une des composantes qui paraît le plus clairement atteinte lors du vieillissement, tel que décrit plus haut (Hasher & Zacks, 1988). Des différences quant à l'inhibition pourraient donc permettre de distinguer les profils de contrôle attentionnel chez les personnes âgées.

Afin de mieux comprendre les facteurs qui sont à l'origine des variabilités inter- et intra-individuelles, il est également pertinent d'examiner si les individus appartenant à différents profils de contrôle attentionnel diffèrent quant aux facteurs qui contribuent au déclin cognitif avec l'âge, comme nous le verrons dans la prochaine section.

### **1.4.3 Facteurs associés aux différences individuelles sur le plan cognitif**

Différents facteurs ont été examinés pour rendre compte des différences interindividuelles (Depp, Harmell, & Vahia, 2012; Rowe & Kahn, 1987). Ces facteurs peuvent être regroupés en deux grandes catégories, soient les variables intellectuelles et les variables liées à la santé.

Parmi les variables intellectuelles, un haut niveau d'éducation a fréquemment été associé avec un meilleur fonctionnement cognitif chez les personnes âgées (Anstey & Christensen, 2000; Christensen, 2001; Satz, Cole, Hardy, & Rassovsky, 2011; Stern, 2009). Une haute intelligence serait également associée à un plus faible risque de démence (Sole-Padullas et al., 2009; Stern, 2006, 2009). Cet effet d'intelligence a été relié à la notion de réserve cognitive, qui rendrait compte d'une partie de la variabilité entre les individus quant à l'impact du vieillissement cérébral sur leur fonctionnement cognitif (Satz et al., 2011). L'intelligence serait l'un des facteurs associés à la capacité à recruter des réseaux neuronaux alternatifs pour effectuer une tâche, ce qui permet à certains individus de compenser mieux que d'autres pour des dommages cérébraux (Stern, 2002). De plus, dans les études ayant porté sur la variabilité interindividuelle, un sous-groupe dont la performance est globalement plus basse a également tendance à être moins éduqué (Hilborn et al., 2009; Ylikoski et al., 1999). L'effet protecteur de l'éducation a toutefois été observé sur les habiletés cristallisées, telles que les connaissances sémantiques, mais pas sur les habiletés fluides, comme le raisonnement (Anstey & Christensen, 2000; Christensen, 2001). Il est donc envisageable que le niveau d'éducation soit peu associé à la variabilité interindividuelle en MdeT.

Par ailleurs, plusieurs variables liées à la santé ont un lien avec le fonctionnement exécutif dans le vieillissement. La présence de problèmes de santé mentale comme la dépression est associée à une diminution de l'efficacité des fonctions cognitives, telles que le

contrôle exécutif ou la vitesse de traitement (Austin, Mitchell, & Goodwin, 2001). D'ailleurs, dans une étude sur la variabilité interindividuelle, un sous-groupe globalement moins performant sur le plan cognitif présente davantage de symptômes dépressifs que les sous-groupes plus performants (Hilborn et al., 2009). L'état de santé physique serait également lié au fonctionnement cognitif des personnes âgées, en particulier à la vitesse de traitement (Christensen, 2001), mais des résultats divergents ont été montrés lorsque l'état de santé est autorapporté (Anstey & Christensen, 2000). En particulier, la présence de facteurs de risque vasculaires est reliée à un fonctionnement cognitif moins efficace, surtout au niveau de l'attention et des fonctions exécutives (Novak & Hajjar, 2010; Villeneuve, Belleville, Massoud, Bocti, & Gauthier, 2009).

Le deuxième grand volet de cette thèse portera donc sur la variabilité interindividuelle présente associée au vieillissement normal des FCA sous-tendant la MdeT, et des caractéristiques qui y sont associées.

### **1.5 Objectifs et hypothèses de recherche**

Le présent projet s'appuie sur un modèle selon lequel trois FCA relativement indépendantes, l'alternance, l'inhibition et la mise à jour, qui sous-tendraient le bon fonctionnement de l'administrateur central (Miyake et al., 2000). Ce modèle a été validé auprès de jeunes adultes, et plusieurs études suggèrent que cette organisation est également présente chez les personnes âgées normales. L'effet de l'âge sur ces trois FCA n'est cependant pas clair. De plus, on ne connaît pas la contribution relative de ces fonctions aux tâches complexes de MdeT. En outre, il est possible que les inconsistances observées quant à l'effet de l'âge sur la MdeT découlent du fait que différentes tâches de MdeT fassent appel à des FCA différentes et sur lesquelles le vieillissement n'a pas le même impact. Enfin, il semble que les FCA auxquelles les personnes âgées ont recours pour réaliser une tâche exécutive complexe puissent différer de celles utilisées par les jeunes adultes (Hull et al., 2008; Miyake et al., 2000). Ceci n'a cependant pas été exploré pour des tâches de MdeT.

De plus, une importante variabilité interindividuelle est présente dans le vieillissement normal, de sorte que différents sous-groupes d'individus présentant des profils distincts de



forces et de faiblesses peuvent être identifiés. Certains facteurs, notamment des variables intellectuelles, des variables liées à la santé, et des variables cérébrales, ont été identifiés comme étant associés à cette variabilité interindividuelle. Ceci n'a toutefois été évalué qu'à travers les grands domaines cognitifs. À ce jour, aucune étude ne semble s'être penchée sur l'existence de tels sous-groupes pour ce qui est de processus cognitifs plus fins, comme les FCA sous-tendant la MdeT.

### **1.5.1 Article 1 : Le vieillissement normal des FCA qui sous-tendent la mémoire de travail.**

**Objectifs.** L'article 1 a pour objectif d'examiner l'impact du vieillissement normal sur la performance à diverses tâches complexes de MdeT et sur chacune des FCA qui sous-tendent la MdeT (alternance, inhibition et mise à jour). Cette étude vise également à identifier les FCA qui contribuent à la réalisation de chaque tâche complexe de MdeT, et si la contribution de ces fonctions diffère selon le groupe d'âge. Pour cela, 75 jeunes adultes et 75 personnes âgées en santé accompliront des tâches mesurant l'alternance, l'inhibition, la mise à jour et la vitesse de traitement, ainsi que trois tâches complexes de MdeT. Une analyse multivariée de covariance (MANCOVA) sera d'abord utilisée pour examiner l'effet du vieillissement sur les trois FCA en contrôlant pour le ralentissement cognitif. Des analyses de variance (ANOVA) permettront ensuite de déterminer l'impact du vieillissement normal sur chaque tâche complexe de MdeT. Enfin, des analyses de régressions multiples seront conduites pour déterminer les FCA qui contribuent à la réalisation des tâches complexes de MdeT, et si ces fonctions varient en fonction du groupe d'âge.

#### ***Hypothèses.***

- 1) Il est attendu que le vieillissement aura un impact différentiel sur les trois FCA, et que l'inhibition sera particulièrement sensible aux effets de l'âge comparativement à la mise à jour ou à l'alternance, et ce même en contrôlant statistiquement pour le ralentissement cognitif.
- 2) L'impact du vieillissement normal sur la MdeT devrait différer en fonction de la tâche utilisée. Il est attendu que les tâches d'empan de phrases et de Brown-Peterson seront plus sensibles aux effets de l'âge que la tâche d'empan alphabétique.

3) Même si la littérature n'est pas claire à cet égard, il est probable sur la base des modèles théoriques que la performance aux tâches de Brown-Peterson, d'empan de phrases et d'empan alphabétique soit prédite par des FCA différentes.

4) Les personnes âgées devraient avoir recours à des fonctions différentes des jeunes adultes pour effectuer une même tâche de MdeT. En particulier, compte tenu des données de Hull et collaborateurs (2008), il est attendu que la mise à jour contribue de façon importante à la MdeT des personnes âgées.

### **1.5.2 Article 2 : Variabilité interindividuelle dans les profils de contrôle attentionnel des jeunes adultes et des personnes âgées.**

**Objectifs.** L'article 2 vise à rendre compte de la variabilité interindividuelle dans les FCA à la base de la MdeT (alternance, inhibition et mise à jour) parmi des jeunes adultes et des personnes âgées. Cette étude explorera également si les profils de contrôle attentionnel des âgés diffèrent de ceux des jeunes en termes d'homogénéité à travers les trois FCA. Les échantillons de jeunes et de personnes âgées sont les mêmes que ceux utilisés pour la première étude. Nous explorerons aussi si les individus appartenant à différents profils de contrôle attentionnel se distinguent sur certaines variables intellectuelles et de santé, ainsi que sur leurs performances à des épreuves neuropsychologiques. Pour répondre à ces objectifs, des analyses hiérarchiques en grappes seront réalisées en utilisant des scores composites d'alternance, d'inhibition, et de mise à jour. Des mesures du fonctionnement intellectuel et des questionnaires de santé caractériseront les participants sur le plan de certaines des variables connues pour être associées aux différences individuelles au niveau cognitif, et diverses épreuves neuropsychologiques leur seront administrées.

#### ***Hypothèses.***

1) On devrait observer plus de variabilité intra-individuelle à travers les trois FCA dans les profils de contrôle attentionnel des personnes âgées que dans ceux des jeunes adultes.

2) Les différents profils observés chez les personnes âgées se distingueront de façon particulièrement marquée sur le plan de l'inhibition.

3) De plus, les profils caractérisés par un contrôle attentionnel moins efficace devraient présenter davantage de facteurs de risques vasculaires et de symptômes dépressifs que les

autres profils, et ils seront moins performants sur des mesures neuropsychologiques (MdeT, mémoire épisodique et vitesse de traitement).

## **CHAPITRE II**

### **Article 1**

### **Apport de chaque coauteur**

**Stéphanie Sylvain-Roy** a fait la revue de la littérature, élaboré les objectifs et hypothèses de la recherche, créé les tâches expérimentales, recruté et testé les participants, analysé les données, et rédigé l'article.

**Ovidiu Lungu** a participé aux analyses statistiques et à l'interprétation des résultats.

**Sylvie Belleville** a été impliquée, en tant que directrice de recherche, à chacune des étapes énumérées ci-haut.

**Normal aging of the attentional control functions that underlie working memory**

Stéphanie Sylvain-Roy, Ovidiu Lungu and Sylvie Belleville

*Manuscrit en préparation.*

## **Abstract**

This study assessed the effect of aging on three attentional control functions – shifting, inhibition, updating – and on their contribution to working memory (WM) tasks. Complex WM tasks (the Brown-Peterson procedure, the Reading span, and the Alpha span) and tasks used to derive composite measures of the attentional control functions, were administered to 75 older and 75 older adults. Of the three attentional control functions, only inhibition was impaired in aging after controlling for processing speed. Furthermore, the effect of aging on WM tasks was not pervasive, as older adults showed impaired performance on the Brown-Peterson procedure and the Reading span, but not on the Alpha span. When examining the contribution of attentional controls functions to WM in older adults, updating accounted for performance on the Brown-Peterson and Reading span tasks, and inhibition was involved in performance on the Alpha span task. In younger adults, it was processing speed that contributed the most to WM. This pattern of results suggests that complex WM tasks reflect different attentional controls functions and that this varies as a function of age.

**Key words:** Aging, Working Memory, Attentional Control, Shifting, Inhibition, Updating.

## **1. Introduction**

A growing number of authors argue that working memory (WM) is not a unitary construct, but rather comprises a few dissociable basic controlled processes (e.g. Engle & Kane, 2004; Miyake et al., 2000). In an effort to characterize those processes, Miyake and collaborators (2000) proposed that the central executive component of WM comprises three relatively independent attentional control functions (ACF): shifting, inhibition, and updating. Shifting is the capacity to alternate between different tasks or between different elements within a task (Monsell, 1996). Inhibition is the ability to refrain from producing a prepotent or automatic response (Logan, 1994). Updating involves modifying the contents of WM by encoding new relevant information and by suppressing information that was previously held in WM but that is no longer relevant (De Beni & Palladino, 2004). Miyake et al. found those three functions to be moderately correlated in young adults, an association that might reflect the ability to maintain goal- and other task-relevant information activated in WM (Engle, 2002; Engle, Kane, & Tuholski, 1999). However, these functions were also separable, and a three-factor model provided the best fit to their data in confirmatory factor analyses.

Studies have then examined whether the structure of attentional control found by Miyake et al. (2000) for younger adults also applies to older adults. Many studies with healthy older adults observed a structure very similar to that of Miyake et al., identifying separable shifting, inhibition, and updating factors (De Frias, Dixon, & Strauss, 2009; Fisk & Sharp, 2004; Vaughan & Giovanello, 2010). Note that three studies did not replicate Miyake et al.'s structure. For instance, Hull and collaborators (Hull, Martin, Beier, Lane, & Hamilton, 2008) identified shifting and updating as two separable factors, but inhibition was not identified as a



third component. Two other studies showed that shifting and updating can be accounted for by a single factor (Adrover-Roig, Sese, Barcelo, & Palmer, 2012; Hedden & Yoon, 2006). However, those three studies used rather complex tasks as measures of the ACFs, which may have resulted in more shared variance because of the more general executive demands of the tasks. In summary, it appears that attentional control can be accounted for by the same general structure in older adults as in younger ones. It is however important to point out that such qualitative similarities in the structure of attentional control do not necessarily mean quantitative similarities between younger and older adults.

It is not clear from the literature whether normal aging has a differential effect on those ACFs, and thus, two crucial questions are: the extent to which these are affected by the normal aging process and whether they are affected to the same degree. There is general agreement that inhibition declines markedly with aging (e.g. Baddeley, 1996; Hasher & Zacks, 1988) and that this decline contributes to many of the age-related impairments found with complex cognitive tasks. This finding led to a number of theoretical views proposing inhibition as a key factor of cognitive aging (e.g. Hasher & Zacks, 1988). However, whether the decline in inhibition is indeed the main attentional control impairment in aging remains uncertain. Shifting appears to be selectively impaired by aging; whereas global shift cost is larger in older than younger adults, local shift cost was found to not be sensitive to aging (Wasylyshyn, Verhaeghen, & Sliwinski, 2011). Results on updating are inconsistent; many authors have shown lower updating capacities in older adults than in younger adults (e.g. De Beni & Palladino, 2004; Van der Linden, Bredart, & Beerten, 1994), while others have not (e.g. Verhaeghen & Basak, 2005). Thus, even though normal aging does not seem to alter the

overall *organization* of the ACFs of WM (shifting, inhibition, and updating), it appears to have a different impact on the *efficacy* of those processes, with some being impaired and others showing relative resistance to the age effect. However, the abovementioned studies have important limitations. First, the absence of significant age-related impairments in some of those studies may have resulted from the lack of statistical power inherent in small sample sizes. Second, results from some studies might be attributed to their focus on one single measure of an ACF, thereby neglecting the contribution of nonexecutive processes to performance. Third, very few of these studies have controlled for the effect of generalized slowing, in spite of the fact that it has been shown to account for a significant proportion of the age-related differences in WM (Salthouse, 1992; 1996).

Moreover, evidence suggests that those ACFs vary in their contribution to complex cognitive tasks. For instance, Miyake et al. (2000) found that the operation span, a complex WM task, only relies on updating, contrary to performance on the Wisconsin Card Sorting Test which was found to depend on shifting, and performance on the Tower of Hanoi which was found to depend on inhibition. McCabe and collaborators have reported a strong correlation between executive functions and WM capacity, both measured globally with composite scores (McCabe, Roediger, McDaniel, Balota & Hambrick, 2010). However, the relationship between WM and separable executive functions, such as the ACFs identified here, remains unexplored so far. The Brown-Peterson procedure, the reading span, and the alpha span are typical WM tasks, in that they all require participants to maintain a small amount of information for a short time while performing some other cognitive activity. However, each

also has some distinct characteristics, which suggests that they may not all rely on the same basic ACFs.

Additionally, the impact of age on the ability to perform those complex WM tasks might differ. Age-related impairment was quite consistently reported on the reading span (Meguro et al., 2000), a classical measure of WM, in which participants are asked to memorize the last word of a series of sentences while judging their semantic plausibility. In contrast, age was found to have a rather small impact (Lamar, Zonderman, & Resnick, 2002) or no impact (Belleville, Rouleau, & Caza, 1998) on the alpha span task, which requires participants to recall a series of words in alphabetical order rather than in the order of presentation (Craik, 1986). For the Brown-Peterson procedure, in which one is required to maintain a small number of items in memory while executing an interfering task, reduced performance in older adults has been reported (e.g. Floden, Stuss, & Craik, 2000; Inman & Parkinson, 1983), although some studies found no age-related impairment (Belleville, Peretz, & Malenfant, 1996; Bherer, Belleville, & Peretz, 2001). The differences in the age-related patterns of impairment might be due to the fact that those three tasks vary in the finely tuned ACFs that they involve. It is, therefore, important to determine which function or set of functions contributes to performance on those tasks. For instance, WM tasks that rely on the most impaired functions, such as inhibition, might be most affected by aging. Alternatively, it is possible that WM tasks are completed in a flexible way and that older adults compensate by relying on a non-impaired function, if the one that is typically recruited by the task is impaired.

Interestingly, there are indications that different age groups vary in terms of the ACFs they use to perform complex tasks. Indeed, whereas younger adults rely on inhibition when performing the Tower of Hanoi and on shifting when performing the Wisconsin Card Sorting Task (Miyake et al., 2000), older adults rely on updating to perform both tasks (Hull et al., 2008). This greater reliance of older adults on updating might be due to this ACF taking over to perform the tasks more efficiently, as updating appears to be better preserved than inhibition and shifting in aging. Taken together, the results from the studies of Hull in older adults and of Miyake in younger adults suggest that performance on clinical executive tasks is subtended by different ACFs in younger and older adults, the latter relying more on their preserved updating abilities than the former. Therefore, an important aim of the present study was to examine in a single design whether the ACFs that contribute to WM are the same for younger and older adults.

In sum, the purposes of the present study were three-fold. The first objective was to evaluate the effect of normal aging on shifting, inhibition, and updating, three key ACFs, when controlling for generalized slowing. We expected the impact of aging on inhibition to be particularly substantial. The second objective was to assess the impact of normal aging on WM, as measured by three complex WM tasks – the Brown-Peterson procedure, the reading span task, and the alpha span task. Aging was expected to have a greater effect on performance on the reading span and Brown-Peterson procedure than on the alpha span. The third objective was to investigate which ACFs contribute to performance on complex WM tasks and whether older adults rely on the same ACFs as younger adults to perform those tasks. As was shown for executive tasks, we expected that different WM tasks would involve

different ACFs. We also expected that the predictors for a given task would be different for older and younger adults. In particular, we expected the performance of older adults to be particularly influenced by their updating abilities, perhaps in an attempt to compensate for impairments in the other ACFs involved in a given task.

Unlike previous studies, which have generally focused on one WM task or on one ACF, this study was innovative in that the same groups of older and younger adults were compared across all three ACFs and across various WM tasks. Therefore, if age differences were found on WM tasks or on the ACFs that contribute to those tasks, they could not be possibly attributable to differences in the characteristics of the samples across different studies. Furthermore, processing speed is an important factor in age-related cognitive decline (Salthouse, 1996) and in WM (Fry & Hale, 1996; Salthouse, 1996). It is thus surprising that previous studies did not control for processing speed in the examination of age-related differences in the ACFs and did not include speed as a potential contributor to performance in their models. Finally, this is the first study that related WM tasks and ACFs in an attempt to better account for their mechanisms in different age groups.

## **2. Methods**

### **2.1 Participants**

The study included 150 participants (75 younger adults and 75 healthy older adults), recruited from the local community. The following conditions resulted in exclusion from the study: uncorrected vision or hearing deficit, presence or history of alcoholism or drug

addiction, severe psychiatric disorder, significant cerebrovascular disorder, neurological disorder, concussion or traumatic brain injury, systemic disease known to impair cognition, general anaesthesia in the last six months, and impairment of hand motility. The Mini Mental State Examination (MMSE; Folstein, Folstein, & McHugh, 1975) was administered to elderly participants as a screening tool for dementia or mild cognitive impairment. We also administered a test of verbal memory (RL/RI-16; Van Der Linden et al., 2004), the Similarities subtest of the Wechsler Adult Intelligence Scale (WAIS-III; Wechsler, 1997), the Charlson Comorbidity Scale (Charlson, Pompei, Ales, & MacKenzie, 1987), and the Beck Depression Inventory (Beck, Steer, Ball, & Ranieri, 1996) for young adults or the Geriatric Depression Scale (Yesavage et al., 1982) for older adults. Table 1 provides a detailed description of the sample. Written informed consent was obtained from all participants.

## **2.2 Materials**

### **2.2.1 Complex working memory tasks.**

*Adapted Brown-Peterson task* (Belleville et al., 1996; adapted from Brown, 1958, and Peterson & Peterson, 1959). Participants held three consonants in WM while performing a simple addition task (add 1 to random numbers) during a short delay (0, 10, 20, or 30 seconds, in a pre-randomized order). Consonants and numbers were presented orally. Participants responded orally to the additions task. An auditory signal instructed them to recall the consonants by writing them down in the order of presentation.

*Reading span* (De Ribaupierre & Ludwig, 2003; adapted from Daneman & Carpenter, 1980). In this computerized task, participants read series of semantically correct or anomalous sentences. They made a yes/no semantic plausibility judgment following each sentence and

recalled the last word of each sentence at the end of the series. Series varied in length from two to five sentences, and there were four blocks for each series length. Participants responded orally for the word recall and by pressing on the computer keyboard for the plausibility judgment. Participants were instructed to recall words in the order of presentation.

*Alpha span* (Belleville et al., 1998). Participants recalled 10 series of words in the order of presentation and 10 series of words in alphabetical order. The number of words to be recalled in each series corresponded to the participant's word span, as measured just prior to the task. The series of words were read aloud by the examiner, and participants gave their response orally.

### **2.2.2 Attentional control measures.**

#### ***Shifting.***

*Plus-minus task.* In this adapted paper-and-pencil task (Jersild, 1927; Spector & Biederman, 1976), participants were asked to add, subtract, or alternate between addition and subtraction from two-digit numbers. The total time to complete each condition was recorded, and a global shift cost was calculated by subtracting the mean time to complete the two non-shift conditions from the time to complete the shifting condition.

*Number-letter task.* In this task (adapted from Rogers & Monsell, 1995), participants were asked to alternate their response set to a series of number-letter pairs (e.g., 6B), presented in one of four quadrants on the computer screen. When the pair was presented in one of the top two quadrants, participants indicated whether the number was odd or even. When the pair was presented in one of the bottom quadrants, they indicated whether the letter was a vowel or a consonant. A global shift cost was computed by subtracting the mean RT for two non-shift conditions from the mean RT for the shifting trials in a shifting condition.

*Left-right shifting.* This was the left-right condition of the Belleville et al. task (2008). Two digits were presented to participants, who identified either the digit presented to the left (block 1) or to the right (block 2). In the shifting block, they alternated between identifying the digit on the right side and the digit on the left side, as indicated by a visual cue presented every five to nine trials. The dependent variable was a global shift cost, computed by subtracting the mean RT for the non-shift blocks from the mean RT for trials requiring a shift.

***Inhibition.***

*Antisaccade task.* In this task adapted from Roberts, Hager, and Heron's task (1994), a visual cue was first presented on either the left or the right side of the screen, immediately followed by the target arrow, which always appeared on the side opposite to the cue. Participants indicated the direction in which the arrow had pointed. The dependent variable was the proportion of correct responses.

*Modified version of the Stroop task.* In this adapted version of the Stroop paradigm (Miyake et al., 2000; Stroop, 1935), participants are asked to name the colour of printed words or items. It comprised control trials (asterisks), incongruent trials (colour words printed in a different coloured ink), and congruent trials (colour words printed in their colour). All conditions were presented randomly in a single block of trials. Participants responded orally using an RT-recording microphone. Inhibition cost (the mean RT for incongruent trials minus the mean RT for control trials, divided by the mean RT for control trials) was used as the dependent variable.

*Stop-signal task.* In this adapted version of Logan's (Logan, 1994) task, participants responded to a series of targets and were instructed to inhibit their response upon presentation of an auditory signal. In a first series of trials, participants were asked to indicate as fast as



possible whether or not a word presented on the screen corresponded to an animal. In a second series, an auditory signal was presented randomly to indicate that the response had to be refrained. For trials in which the auditory signal was presented, the delay between the onset of the word and the occurrence of the auditory signal was individually adapted based on the first part of the task so that it corresponded to the participant's mean RT minus 225 ms. The task was presented with E-Prime (Schneider, et al., 2002) and participants responded on the computer keyboard. The dependent variable was the proportion of responses given on trials in which the auditory signal was presented, therefore corresponding to a failure in inhibiting the response.

### *Updating.*

*Keep-track task.* This adapted version of Yntema's (1963) task included a series of visually presented words that belonged to one of four semantic categories. Participants were instructed to pay attention to the semantic category of each word and to report at the end of the series the last word they had seen that belonged to each of the semantic categories. There were six series of 12 randomly-presented words, each series containing three exemplars from four of the six semantic categories. The dependent variable was the proportion of correct responses.

*Tone-monitoring task.* In this computerized adaptation of the Larson, Merritt, and Williams task (1988) and the Miyake et al. (2000) task, a series of tones with either a high, medium, or low pitch were presented randomly. Participants were instructed to keep track of the number of tones presented for each pitch level and to press on the appropriate key on the computer keyboard when they had heard three tones for any given pitch level. The dependent variable was the proportion of correct responses.

*Letter updating task.* In this task (adapted from Morris & Jones, 1990), series of consonants were presented visually, and participants were asked to orally recall the last consonants of the series. The number of consonants to be recalled corresponded to the participant's consonant span (evaluated prior to the task) minus one item. Series of four different lengths (participant's span minus one, plus one, three, or five items) were presented in random order. The dependent variable was the proportion of correct responses.

### **2.2.3 Processing speed tasks.**

*Choice reaction time.* In this computerized task (Bherer & Belleville, 2004), participants had to indicate as fast as possible whether a black circle was presented on the left or right side of the screen by pressing the appropriate button on a response box. The dependent variable was the mean RT for correct responses.

*Digit comparison.* Pairs of digits were visually presented on a computer screen, and participants indicated as fast as possible whether the two digits were identical or different. There were 30 trials, half of which were identical. The mean RT for correct responses was used as the dependent variable.

## **2.3 Procedure**

Participants were tested individually over two sessions of approximately two hours each. There was an interval of about one week between the two testing sessions. Exceptionally, a few participants had to come for a third testing session when it had not been possible for them to complete all tasks within the first two sessions. The order of presentation of the different tasks and conditions was the same for all participants, so as to allow for inter-individual comparisons. The order in which tasks were administered was first pseudo-

randomized so that no tasks measuring the same construct followed each other. The order of experimental tests for the first session was as follows: left-right shifting, choice reaction time, antisaccade, tone-monitoring, modified version of the Stroop task, alpha span, adapted Brown-Peterson task. The order of tests for the second session was as follows: number-letter, keep-track, digit comparison, plus-minus, letter updating, reading span. The following tasks were presented using E-Prime (Schneider, Eschman, & Zuccolotto, 2002): reading span, number-letter task, antisaccade, modified version of the Stroop, keep-track, tone monitoring, letter updating, and digit comparison. PsyScope (Cohen, MacWhinney, Flatt, & Provost, 1993) was used for the left-right shifting task and the choice reaction time task.

## **2.4 Statistical analyses**

Reaction time (RT) and proportion of correct responses were used as dependent variables. RTs were then log-transformed after trials that were more than 3 SDs away from an individual's mean RT were discarded. Arcsine transformations were applied to proportion variables in order to reduce ceiling and floor effects (Judd, McClelland, & Ryan, 2009). The directionality was inverted for some of the variables so that higher values always indicated better performance. As preliminary analyses, the effect of aging on each of the tasks that were used to measure the ACFs and speed was examined using independent samples t-tests, with a two-tailed alpha level corrected with Bonferroni adjustment ( $0.05/10 = 0.005$  alpha level).

To examine the effect of aging on the three ACFs and the contribution of processing speed, we computed a composite score for each construct, based on the mean *z*-score on the tasks measuring that construct. The impact of aging on the processing speed composite score

was assessed using an independent samples *t*-test with a two-tailed alpha level. A multivariate analysis of covariance (MANCOVA) was then conducted to assess the impact of aging on the three attentional control composite scores after controlling for processing speed, with a two-tailed alpha level corrected with Bonferroni adjustment ( $0.05/3 = 0.017$  alpha level). To examine the impact of aging on the complex WM tasks, mixed ANOVAs were used, with group as a between-subject factor and the condition specific to each task (e.g., delay, number of sentences, or recall condition) as a within-subject factor. Finally, to determine which ACF or set of functions contributed to performance on complex WM tasks, backward multiple regression analyses were used separately for each complex task. Attentional control composite scores and processing speed composite scores were used as predictors. Dummy variables were then created to describe the group (0 = young adults, 1 = older adults) and the interactions between group and each basic process. These interaction variables were also used as predictors to test whether the relationships between the ACFs and the complex WM tasks differed as a function of age group.

### **3. Results**

#### **3.1 Preliminary data analyses**

The distributions for each dependent variable revealed only three outliers: one participant for the plus-minus task, one for the left-right shifting task, and one for the Stroop task. Those three data points were replaced by the value that corresponded to three standard deviations away from the mean in the direction of the deviation. This procedure aids in normalizing the data while still preserving information about the direction in which the extreme score “pulled” the mean (Field, 2005). Skewness and kurtosis were then examined for

each dependent variable. All distributions were considered normal (Kline, 1998). No multivariate outliers were found based on the Mahalanobis distance calculation.

Following administration of the stop-signal task, some participants reported to the experimenter a slight tendency to slow down their responses during the second part of this task, waiting for a potential stop-signal before responding, as compared to the first part of the task where there was no possibility of hearing a stop-signal and this seemed to be the case even though the importance for participants not to slow down their responses was explicitly specified in the instructions. If participants indeed waited for a potential stop-signal before producing a response, the task would not constitute a valid measure of inhibitory processes, since there would be no actual opportunity to inhibit an already engaged motor response. To the extreme, a participant who always waited to be sure that there was no stop-signal before producing a response would have had a perfect score for this task even though he actually did not inhibit a single motor response, as the dependent variable was the proportions of responses produced in trials for which a stop-signal was presented. It thus appeared important to examine whether participants of both groups did indeed slow down their responses in the second part of the task. A mixed ANOVA was therefore performed on mean RT, with condition (first part VS trials requiring no inhibition in the second part) as a within-subject factor and group as a between-subject factor. This aimed at determining the relevance of including this task in subsequent analyses. Results of the mixed ANOVA for the stop-signal task revealed a significant condition X group interaction,  $F(1,140) = 10.617$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .07$ . Analysis of the simple effect of condition for each group revealed that whereas young adults' mean RT did not differ between the two conditions (first part:  $M = 693.47$ ,  $SD = 82.12$ ; trials

requiring no inhibition in the second part:  $M = 707.63$ ,  $SD = 94.08$ ),  $F(1,141) = 2.372$ , ns, older adults significantly slowed down their responses in the second part of the task (first part:  $M = 861.15$ ,  $SD = 118.27$ ; trials requiring no inhibition in the second part:  $M = 915.06$ ,  $SD = 142.15$ ),  $F(1,140) = 37.794$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .21$ . These results show that older adults did not apprehend the task the same way as young adults did. Since at least one part of the sample did not perform the task in a way that would require inhibition, we considered this task not to be a valid measure of inhibitory processes. It was therefore not included in the subsequent analyses.

Table 2 shows the mean scores on the individual tasks used to create composite scores. Table 3 provides skewness and kurtosis values for each composite score, as well as the mean values for each group. Distributions were normal, and no extreme outlier was found. Results of the  $t$ -test showed faster processing speed in younger than older adults,  $t(147) = 14.619$ ,  $p < .001$ ,  $d = 2.39$ .

### **3.2 Effect of age on attentional control functions and speed**

The MANCOVA indicated that, after controlling for processing speed, the group variable had a significant impact on the combined dependent variables (shifting, inhibition, and updating composites scores), Wilk's  $\Lambda = .90$ ,  $F(3,140) = 5.268$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .10$ , and explained 10% of the variance. Given the significance of the overall test, the univariate main effects were examined. There was a significant group difference for inhibition,  $F(1,142) =$

12.283,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .08$ , but the group difference was not statistically significant for shifting,  $F(1,142) = 0.225$ , *ns*, nor for updating,  $F(1,142) = 3.292$ , *ns*.

### 3.3 Effect of age on complex working memory tasks

Figure 1 illustrates the performances of younger and older adults on the three complex WM tasks. For the adapted Brown-Peterson task, the Group x Delay ANOVA indicated a main effect of the delay,  $F(3,435) = 22.338$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .13$ , and a main Group effect,  $F(1,145) = 23.402$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .14$ . A significant Delay X Group interaction was also found,  $F(3,435) = 3.027$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .02$ . Simple effects indicated that both older and younger adults were affected by the delay (older adults,  $F(3,435) = 20.12$ ,  $p < .001$ ; younger adults,  $F(3,435) = 5.14$ ,  $p < .01$ ). Pairwise comparisons with Bonferroni adjustment indicated that the group difference was significant for all delays: 0s [ $F(1,145) = 10.069$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .07$ ], 10s [ $F(1,145) = 18.490$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .11$ ], 20s [ $F(1,145) = 10.301$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .07$ ], and 30s delays [ $F(1,145) = 7.193$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .05$ ]. Examination of Figure 1 and  $F$  values suggests that the interaction is due to older adults having a larger delay effect than younger ones, particularly between the 0-second delay and the 10-second delay conditions.

For the reading span task, the ANOVA indicated a main effect of the number of sentences,  $F(3,432) = 345.237$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .71$ , and a main group effect,  $F(1,144) = 24.898$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .15$ . The Number of Sentences X Group interaction was significant,  $F(3,432) = 6.792$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .04$ . Simple effects indicated that both older and younger adults were affected by the number of sentences: older adults,  $F(3,432) = 215.68$ ,  $p < .001$ ; younger adults,  $F(3,432) = 134.11$ ,  $p < .001$ . Furthermore, pairwise comparisons with Bonferroni adjustment indicated that the group difference was significant for all conditions, but that the effect size

increased with number of sentences:  $F(1,144) = 7.667, p < .01, \eta^2 = .05$ , for two sentences;  $F(1,144) = 13.453, p < .001, \eta^2 = .09$ , for three sentences ;  $F(1,144) = 17.107, p < .001, \eta^2 = .11$ , for four sentences; and  $F(1,144) = 25.180, p < .001, \eta^2 = .15$ , for five sentences. Thus, the interaction is likely due to the fact that older adults were more affected by the increasing number of sentences than were the younger adults.

For the alpha span task, the Group x Recall condition ANOVA indicated a main effect of recall condition,  $F(1,142) = 197.433, p < .001, \eta^2 = .58$ , direct recall being better than alphabetical recall. Neither the main group effect,  $F(1,142) = 1.246, ns$ , nor the Group x Recall condition interaction,  $F(1,142) = .814, ns$ , reached statistical significance.

### **3.4 Contribution of the attentional control and processing speed composite scores to performance on complex WM tasks**

**3.4.1 Adapted Brown-Peterson procedure.** Table 4 presents the standardized regression coefficients of the variables included in the final regression model for the three complex WM tasks. For the Brown-Peterson task, the dependent variable was the total number of consonants correctly recalled. Updating and processing speed significantly explained performance on this task,  $F(2,140) = 22.420, p < .001$ , adjusted  $R^2 = .23$ . This combination of predictors accounted for 23% of the variance. Updating was the most significant predictor, followed by processing speed. A 1-unit increase in the updating score was associated with recalling 1.4 more consonants ( $t = 3.303, p < .01$ ), and an increase of one unit in processing speed led to recalling 1.1 more consonants ( $t = 3.467, p < .01$ ). This model applied regardless of age, as there was no significant interaction with age.



**3.4.2 Reading span.** The dependent variable was the proportion of words correctly recalled. The final model, which accounted for 24% of the variance, indicated that processing speed was the most significant predictor, followed by the interaction between updating and group,  $F(2,139) = 23.792, p < .001$ , adjusted  $R^2 = .24$ . Thus, for both age groups, an increase of one unit in processing speed score was associated with recalling 5.4 more words ( $t = 4.929, p < .001$ ). Moreover, a 1-unit increase in the updating score led to recalling 5.2 more words, but only for older adults ( $t = 2.528, p < .05$ ).

**3.4.3 Alpha span.** The dependent variable was the proportion of words correctly recalled in both the direct recall and the alphabetical recall conditions. The model, which accounted for 5% of the variance, indicated that the interaction between inhibition and group was the most significant predictor, followed by processing speed and the interaction between processing speed and group,  $F(3,136) = 3.414, p < .05$ , adjusted  $R^2 = .05$ . Examination of the regression coefficients indicated that while the inhibition score had no impact on younger adults' performance on this task, for older adults, a 1-unit increase in the inhibition score led to recalling 7.2 more words ( $t = 2.157, p < .05$ ). There was an age-related difference in the contribution of processing speed to performance: in younger adults, a 1-unit increase in processing speed score was associated with recalling 8.2 more words ( $t = 1.859, p < .10$ ), whereas in older adults it was associated with recalling 2.9 less words ( $t = -1.678, p < .10$ ).

## 4. DISCUSSION

### 4.1 Effect of age on the attentional control functions and working memory tasks

A main objective was to examine the impact of aging on the ACFs (shifting, inhibition, and updating) that underlie WM. Only inhibition was impaired in normal aging after controlling for processing speed. This is consistent with prevalent models suggesting that inhibition is one of the main cognitive functions affected by age (Hasher & Zacks, 1988). This decline can impair the elderly's functioning in everyday situations that require inhibition, such as when having a conversation in a noisy environment.

Similarly, not all complex WM tasks showed impairment in normal aging when assessed in a single sample of older and younger adults. Older adults performed more poorly on both the Brown-Peterson and the reading span tasks, which confirms results obtained by a number of other studies (e.g. Floden et al., 2000; Inman & Parkinson, 1983; Meguro et al., 2000). They were nonetheless unimpaired on the alpha span task, which is coherent with previous studies (Belleville et al., 1998; Belleville, Rouleau, Van der Linden, & Collette, 2003). Thus, our results converge with most of the literature, but the strength of the present study is that we assessed different tasks in a single sample of both younger and older participants. Contrary to previous reports, most of which have examined only one task, the present study allowed a direct comparison of the effects of age across tasks, showing that the WM impairment in aging is not pervasive.

#### **4.2 Contribution of the ACFs to performance on complex working memory tasks and theoretical implications**

One important objective was to determine which cognitive function or functions underlie WM and whether these differ as a function of age. There were marked age-related differences

in the contribution of ACFs to performance on complex WM tasks. Although updating contributed to performance on the Brown-Peterson in both older and younger adults, it contributed to performance on the reading span only in older adults. Moreover, inhibition contributed to performance on the alpha span only in older adults. Processing speed also contributed to performance on all three WM tasks.

One critical finding is the age-related increased reliance on updating when performing complex tasks. Of the three WM tasks used in the present study, two were related to updating in older adults, whereas only one was related to updating in younger adults. This increased reliance on updating is also observed with executive tasks, on which updating contributes to older adults' performance (Hull et al., 2008), but it does not contribute to younger adults' performance on the same tasks (Miyake et al., 2000). It thus appears that older adults rely on updating for both executive and WM tasks, while it is used on only some WM tasks by younger adults. This might reflect compensatory processes: since updating is relatively unimpaired with age, this ACF might take over when the other functions involved in a task (such as processing speed) can no longer contribute in an optimal fashion. This idea is coherent with compensatory views of neurocognitive aging. The frontal lobe – typically associated with WM – deteriorates early and at a rather fast pace in aging (Raz, 2000). It is also the most versatile brain region (Park & Reuter-Lorenz, 2009), where many of the alternative circuits are developed. The differential patterns of contributions to WM that we observed between older and younger adults could support the current view that alternative networks are created in aging adults (Park & Reuter-Lorenz, 2009), or that alternative strategies are used in an attempt to perform a task as efficiently as in younger adults

(Belleville et al., 2011). Because WM is dynamic and has a limited capacity, its content needs to be continuously monitored and changed. As the Brown-Peterson and reading span tasks both involve concurrent maintenance and processing of interfering information, continuous updating of the WM contents is probably helpful as one completes the interfering task.

Miyake and Friedman (2012) recently proposed a revision to their original model, which might account for some of our findings, in particular those regarding inhibition. According to this revision, a common executive factor explains part of the variance in updating and shifting, but the whole variance in inhibition. Our results regarding the age-related decline in the ACFs suggest that it is this common executive factor, rather than updating- or shifting-specific processes, that is impaired in normal aging. Moreover, the relatively modest contribution of inhibition to WM might appear as a surprising finding, considering that many models have identified inhibition as a central component of WM (e.g. Christensen, 2001; Mitrushina, Uchiyama, & Satz, 1995; Unsworth, 2010). Inhibition did not explain WM performance in younger adults, and it contributed to older adults' performance only on the alpha span task. This might be due to the fact that inhibition shares much of its variance with updating. It might therefore fail to contribute to performance on WM tasks when this shared variance is statistically controlled for, as is the case with the regression analyses used here. Regarding the alpha span task, it is surprising that older adults rely on inhibition – an impaired ACF – to perform the task. A plausible explanation might be that specific demands of this task do not allow older adults to use updating as a compensatory strategy. It might explain why inhibition, or the common executive factor in Miyake and Friedman's revised model, is more involved in this particular WM task. Even though older adults are impaired on this common executive

factor, the small percentage of explained variance on the alpha span task in our model might explain why their performance on this task is not impaired. Of note is the fact that shifting did not contribute to the WM tasks used in the present study, which may be due to the common variance shared by the three ACFs. This interpretation may be in line with previous work that suggests that in healthy older adults, shifting and updating might be best treated as a single factor (Adrover-Roig et al., 2012; Hedden & Yoon, 2006).

Another critical finding is that in both younger and older adults, processing speed contributed to performance on all WM tasks. In younger adults, speed was the only significant predictor of performance on the reading span and the alpha span. This is in line with numerous studies (e.g. Fry & Hale, 1996; Salthouse, 1996) indicating that speed plays a major role in explaining individual differences in WM performance. Because WM tasks involve a series of steps, the products of each of these steps have to be maintained while performing a subsequent step, which would be particularly detrimental to individuals who process information slowly. Therefore, it is probable that the differences found in the present study between the older and younger adults' performances on complex WM tasks would have been smaller if processing speed had been controlled for in the analyses. That being said, the older adults' performance on all three WM tasks was explained by their attentional control abilities (updating or inhibition), in addition to processing speed, while this was not the case in younger adults. It may be that older adults rely more than younger adults on their ACFs in an attempt to compensate for the impact of slowing on WM. It should however be acknowledged that only a part of the variance is explained by the cognitive processes studied here. A significant part of the variance remains to be explained.

### **4.3 Methodological and clinical implications**

The findings that emerge from the present study can have far-reaching implications in clinical practice or when designing experimental studies on cognitive aging. First, they show that a WM task administered to younger adults and elderly people does not reflect the same basic functions. This finding is important to consider in studies comparing different age groups on complex tasks, as we might not be comparing the same cognitive processes. Second, care should be taken when selecting a test or a set of tests to evaluate the integrity of WM, as WM could be described as impaired or preserved, depending on the test chosen. This study provides important information regarding the combination of tests that should be selected. Optimally, clinicians should favor the use of tests that reflect different ACFs so as to cover the range of possible impairment. Finally, this study emphasizes the importance of understanding which cognitive processes underlie WM and the importance of examining the construct validity of tests as a function of age groups.

**Word count:** 5992 words

### **Acknowledgements**

This work was supported by a grant to SB from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC). SSR was supported by scholarships from NSERC and from the Fonds Québécois de Recherche Nature et Technologies. We would like to thank Emilie Lepage for her help with recruitment, Samira Mellah, Sophie Benoit and Emilie Ouellet for their help with recruitment and testing of participants, Amanda De Filippo for editorial assistance and Francine Giroux for her help with statistical analyses.

## References

- Adrover-Roig, D., Sese, A., Barcelo, F., & Palmer, A. (2012). A latent variable approach to executive control in healthy ageing. *Brain and Cognition, 78*(3), 284-299.
- Baddeley, A. (1996). Exploring the central executive. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology, 49A*(1), 5-28.
- Beck, A. T., Steer, R. A., Ball, R., & Ranieri, W. (1996). Comparison of Beck Depression Inventories -IA and -II in psychiatric outpatients. *Journal of Personality Assessment, 67*(3), 588-597.
- Belleville, S., Bherer, L., Lepage, E., Chertkow, H., & Gauthier, S. (2008). Task switching capacities in persons with Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *Neuropsychologia, 46*(8), 2225-2233.
- Belleville, S., Clement, F., Mellah, S., Gilbert, B., Fontaine, F., & Gauthier, S. (2011). Training-related brain plasticity in subjects at risk of developing Alzheimer's disease. *Brain, 134*(Pt 6), 1623-1634.
- Belleville, S., Peretz, I., & Malenfant, D. (1996). Examination of the working memory components in normal aging and in dementia of the Alzheimer type. *Neuropsychologia, 34*(3), 195-207.
- Belleville, S., Rouleau, N., & Caza, N. (1998). Effect of normal aging on the manipulation of information in working memory. *Memory and Cognition, 26*(3), 572-583.
- Belleville, S., Rouleau, N., Van der Linden, M., & Collette, F. (2003). Effect of manipulation and irrelevant noise on working memory capacity of patients with Alzheimer's dementia. *Neuropsychology, 17*(1), 69-81.



- Bherer, L., & Belleville, S. (2004). Age-related differences in response preparation: the role of time uncertainty. *Journal of Gerontology B: Psychological Science and Social Science*, 59(2), 66-74.
- Bherer, L., Belleville, S., & Peretz, I. (2001). Education, age, and the Brown-Peterson technique. *Developmental Neuropsychology*, 19(3), 237-251.
- Charlson, M. E., Pompei, P., Ales, K. L., & MacKenzie, C. R. (1987). A new method of classifying prognostic comorbidity in longitudinal studies: development and validation. *Journal of Chronic Diseases*, 40(5), 373-383.
- Christensen, H. (2001). What cognitive changes can be expected with normal ageing? *Australia and New Zealand Journal of Psychiatry*, 35(6), 768-775.
- Cohen, J. D., MacWhinney, B., Flatt, M., & Provost, J. (1993). PsyScope: A new graphic interactive environment for designing psychology experiments. *Behavioral Research Methods, Instruments, and Computers*, 25(2), 257-271.
- Conway, A. R. A., Kane, M. J., Bunting, M. F., Wilhelm, O., Engle, R. W., & Hambrick, D. Z. (2005). Working memory span tasks: A methodological review and user's guide. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(5), 769-786.
- Craik, F. I. M. (1986). A functional account of age differences in memory. In F. Klix & H. Hagendorf (Eds.), *Human memory and cognitive capabilities: Mechanisms and performances* (pp. 409-422). Amsterdam: Elsevier, North Holland.
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19(4), 450-466.
- De Beni, R., & Palladino, P. (2004). Decline in working memory updating through ageing: intrusion error analyses. *Memory*, 12(1), 75-89.

- De Frias, C. M., Dixon, R. A., & Strauss, E. (2009). Characterizing executive functioning in older special populations: From cognitively elite to cognitively impaired. *Neuropsychology, 23*(6), 778-791.
- De Ribaupierre, A., & Ludwig, C. (2003). Age differences and divided attention: Is there a general deficit? *Experimental Aging Research, 29*(1), 79-105.
- Engle, R. W. (2002). Working memory capacity as executive attention. *Current Directions in Psychological Science, 11*(1), 19-23.
- Engle, R. W., & Kane, M. J. (2004). Executive attention, working memory capacity, and a two-factor theory of cognitive control. *The psychology of learning and motivation, 44*, 145-199.
- Engle, R. W., Kane, M. J., & Tuholski, S. W. (1999). Individual differences in working memory capacity and what they tell us about controlled attention, general fluid intelligence, and functions of the prefrontal cortex. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 102-134). New York: Cambridge University Press.
- Field, A. (2005). *Discovering statistics using SPSS, Second edition*. Thousand Oaks, California: Sage Publications Inc.
- Fisk, J. E., & Sharp, C. A. (2004). Age-related impairment in executive functioning: updating, inhibition, shifting, and access. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, 26*(7), 874-890.
- Floden, D., Stuss, D. T., & Craik, F. I. M. (2000). Age differences in performance on two versions of the Brown-Peterson task. *Aging, Neuropsychology and Cognition, 7*(4), 245-259.

- 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. *Journal of Psychiatric Research, 12*(3), 189-198.
- Fry, A. F., & Hale, S. (1996). Processing Speed, Working Memory, and Fluid Intelligence: Evidence for a Developmental Cascade. *Psychological Science, 7*(4), 237-241.
- Hasher, L., & Zacks, R. T. (1988). Working memory, comprehension, and aging: A review and a new view. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (Vol. 22, pp. 193-225). San Diego, CA: Academic Press.
- Hedden, T., & Yoon, C. (2006). Individual differences in executive processing predict susceptibility to interference in verbal working memory. *Neuropsychology, 20*(5), 511-528.
- Hull, R., Martin, R. C., Beier, M. E., Lane, D., & Hamilton, A. C. (2008). Executive function in older adults: a structural equation modeling approach. *Neuropsychology, 22*(4), 508-522.
- Inman, V. W., & Parkinson, S. R. (1983). Differences in Brown-peterson Recall As a Function of Age and Retention Interval. *Journal of Gerontology, 38*(1), 58-64.
- Jersild, A. T. (1927). Mental set and shift. *Archives of Psychology, Whole No. 89*.
- Judd, C. M., McClelland, G. H., & Ryan, C. S. (2009). *Data analysis: A model comparison approach (2nd ed.)*. New York, NY: Routledge/Taylor & Francis Group; US.
- Kline, R. B. (1998). *Principles and practice of structural equation modeling*. New York: Guilford Press.

- Lamar, M., Zonderman, A. B., & Resnick, S. (2002). Contribution of specific cognitive processes to executive functioning in an aging population. *Neuropsychology, 16*(2), 156-162.
- Larson, G. E., Merritt, C. R., & Williams, S. E. (1988). Information processing and intelligence: Some implications of task complexity. *Intelligence, 12*(2), 131-147.
- Logan, G. D. (1994). On the ability to inhibit thought and action: A user's guide to the stop signal paradigm. In D. Dagenbach & T. H. Carr. (Eds.), *Inhibitory processes in attention, memory, and language* (pp. 189-239). San Diego, CA: Academic Press.
- McCabe, D. P., Roediger, H. L., McDaniel, M. A., Balota, D. A., & Hambrick, D. Z. (2010). The relationship between working memory capacity and executive functioning: evidence for a common executive attention construct. *Neuropsychology, 24*(2), 222-243.
- Meguro, Y., Fujii, T., Yamadori, A., Tsukiura, T., Suzuki, K., Okuda, J., & Osaka, M. (2000). The nature of age-related decline on the reading span task. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, 22*(3), 391-398.
- Mitrushina, M., Uchiyama, C., & Satz, P. (1995). Heterogeneity of cognitive profiles in normal aging: implications for early manifestations of Alzheimer's disease. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, 17*(3), 374-382.
- Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The Nature and Organization of Individual Differences in Executive Functions: Four General Conclusions. *Current Directions in Psychological Science, 21*(1), 8-14.
- 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. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49-100.
- Monsell, S. (1996). Control of mental processes. In V. Bruce (Ed.), *Unsolved mysteries of the mind: Tutorial essays in cognition* (pp. 93-148). Oxford, England: Erlbaum (Uk) Taylor & Francis, Publ.
- Morris, N., & Jones, D. M. (1990). Memory updating in working memory: The role of the central executive. *British Journal of Psychology*, 81(2), 111-121.
- Park, D. C., & Reuter-Lorenz, P. (2009). The adaptive brain: aging and neurocognitive scaffolding. *Annual Review of Psychology*, 60, 173-196.
- Raz, N. (2000). Aging of the brain and its impact on cognitive performance: Integration of structural and functional findings. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.), *The handbook of aging and cognition* (pp. 1-90). Mahwah: Laurence Erlbaum Associates.
- Roberts, R. J., Hager, L. D., & Heron, C. (1994). Prefrontal cognitive processes: Working memory and inhibition in the antisaccade task. *Journal of Experimental Psychology: General*, 123(4), 374-393.
- Rogers, R. D., & Monsell, S. (1995). Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124(2), 207-231.
- Salthouse, T. A. (1992). Influence of processing speed on adult age differences in working memory. *Acta Psychologica*, 79(2), 155-170. doi: 0001-6918(92)90030-H
- Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review*, 103(3), 403-428.
- Schneider, W., Eschman, A., & Zuccolotto, A. (2002). E-Prime User's Guide. Pittsburgh: Psychology Software Tools Inc.

- Spector, A., & Biederman, I. (1976). Mental set and mental shift revisited. *American Journal of Psychology*, 89, 669-679.
- Strauss, E., Sherman, E. M. S., & Spreen, O. (2006). *A compendium of neuropsychological tests: Administration, norms and commentary*. New York: Oxford University Press.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- Unsworth, N. (2010). Interference control, working memory capacity, and cognitive abilities: A latent variable analysis. *Intelligence*, 38, 255-267.
- Van der Linden, M., Bredart, S., & Beerten, A. (1994). Age-related differences in updating working memory. *British Journal of Psychology*, 85(1), 145-152.
- Van Der Linden, M., Coyette, F., Poitrenaud, J., Kalafat, M., Calicis, F., Wyns, C., & Adam, S. (2004). L'épreuve de rappel libre/rappel indicé à 16 items (RL/RI-16). In M. Van Der Linden (Ed.), *L'évaluation des troubles de la mémoire: Présentation de quatre tests de mémoire épisodique (avec leur étalonnage)*: Solal.
- Vaughan, L., & Giovanello, K. (2010). Executive function in daily life: Age-related influences of executive processes on instrumental activities of daily living. *Psychology and Aging*, 25(2), 343-355.
- Verhaeghen, P., & Basak, C. (2005). Ageing and switching of the focus of attention in working memory: results from a modified N-back task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 58(1), 134-154.
- Verhaeghen, P., Marcoen, A., & Goossens, L. (1993). Facts and fiction about memory aging: A quantitative integration of research findings. *Journal of Gerontology: Psychological Science*, 48(4), 157-171.

- Wasylyshyn, C., Verhaeghen, P., & Sliwinski, M. J. (2011). Aging and task switching: A meta-analysis. *Psychology and Aging, 26*(1), 15-20.
- Wechsler, D. (1997). *Administration and scoring manual: Wechsler Adult Intelligence Scale, Third Edition*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.
- Yesavage, J. A., Brink, T. L., Rose, T. L., Lum, O., Huang, V., Adey, M., & Leirer, V. O. (1982). Development and validation of a geriatric depression screening scale: a preliminary report. *Journal of Psychiatric Research, 17*(1), 37-49.
- Yntema, D. B. (1963). Keeping track of several things at once. *Human Factors, 5*(1), 7-17.

Table 1

*Group Means and Standard Deviations (in Parenthesis) for Demographic Characteristics and Performance on Neuropsychological Measures*

	Younger adults	Older adults
Women/Men	42/33	46/28
Age	23.7 (3.9)	70.9 (6.1)
Years of Education	13.6 (2.6)	14.6 (3.5)
MMSE	n/a	29.0 (1.1)
MoCA	n/a	27.4 (2.2)

*Note.* MMSE = Mini Mental State Examination; MoCA = Montreal Cognitive Assessment. One elderly participant was excluded on the basis of her MMSE score, which was below 24, the cut-off for this test (Folstein et al., 1975). The sample used for the analyses thus comprised 75 younger adults and 74 older adults. Groups did not differ on the clinical dimensions and on their level of education,  $t(147) = -1.91$ , *ns*.



Table 2

*Mean Performance and Standard Deviations (in Parenthesis) on the Tasks Measuring Each ACF and Processing Speed*

	Young adults	Older adults
Shifting		
Plus-minus task <sup>a</sup>	-1.36 (0.25)	-1.41 (0.29)
Number-letter task <sup>a</sup>	-2.75 (0.19)	-2.87 (0.19) *
Left-right shifting <sup>a</sup>	-2.42 (0.16)	-2.61 (0.25) *
Inhibition		
Antisaccade task <sup>b</sup>	1.25 (0.21)	0.81 (0.25) *
Stroop task <sup>a</sup>	-0.19 (0.10)	-0.30 (0.17) *
Updating		
Keep-track task <sup>b</sup>	0.78 (0.13)	0.69 (0.15) *
Tone-monitoring task <sup>b</sup>	0.95 (0.27)	0.66 (0.25) *
Letter updating task <sup>b</sup>	0.73 (0.22)	0.66 (0.20)
Processing speed		
Choice reaction time <sup>a</sup>	-2.85 (0.06)	-3.00 (0.09) *
Digit comparison <sup>a</sup>	-2.73 (0.05)	-2.85 (0.69) *

<sup>a</sup> Inverted log-transformed reaction time. <sup>b</sup> Arcsine transformed proportion of correct responses. \* Significant difference between younger adults and older adults, after adjustment for multiple comparisons,  $p < .005$ .

Table 3

*Distribution Characteristics of the Composite Scores and Means for Each Group*

	Skewness	Kurtosis	Young adults	Older adults
Shifting	-0.10	-0.14	0.27 (0.65)	-0.27 (0.69)
Inhibition	-0.60	0.17	0.51 (0.51)	-0.52 (0.83)
Updating	-0.06	-0.02	0.32 (0.61)	-0.35 (0.70)
Processing speed	-0.60	-0.08	0.71 (0.44)	-0.72 (0.73)

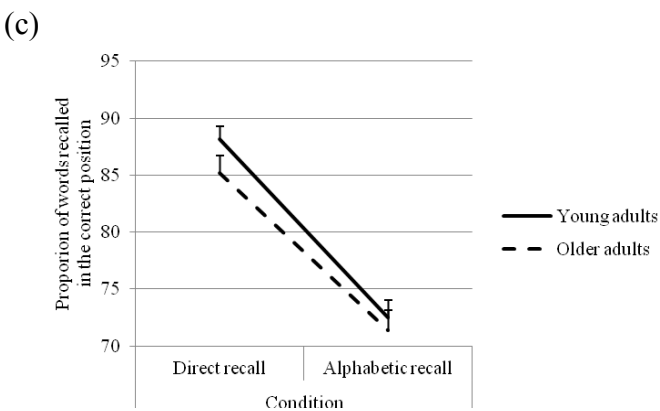
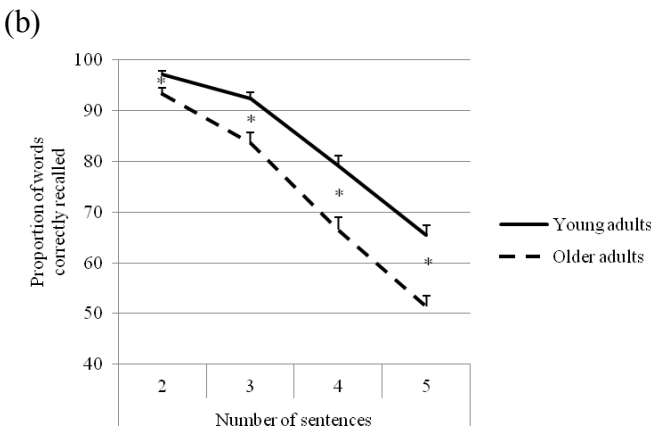
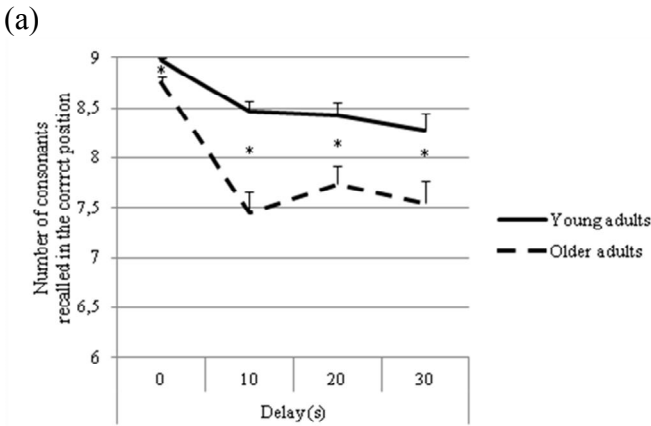
Table 4

*Significant Predictor Variables in the Final Multiple Regression Model for Each Complex Working Memory Task*

Complex working memory task	Adjusted R <sup>2</sup>	$\beta$	$p$
Brown-Peterson procedure	.23		< .01
Updating		.28	< .01
Processing speed		.29	< .01
Reading span	.24		< .01
Processing speed		.39	< .01
Updating x Group		.20	< .05
Alpha span	.05		< .05
Inhibition x Group		.20	< .05
Processing speed		.33	< .10
Processing speed x Group		-.29	< .10

Figure 1

*Impact of Normal Aging on Performance on the Complex Working Memory Tasks*



(a) Brown-Peterson task: Mean number of consonants recalled in the correct position for each of the four delays, for young and older adults. (b) Reading span: Mean proportion of words correctly recalled for each of the four possible number of sentences, for young and older adults. (c) Alpha Span: proportion of words recalled in the correct position for each condition, for young and older adults. \* Significant difference between young and older adults,  $p < .05$ .

## **CHAPITRE III**

### **Article 2**

### **Apport de chaque coauteur**

**Stéphanie Sylvain-Roy** a fait la revue de la littérature, élaboré les objectifs et hypothèses de la recherche, créé les tâches expérimentales, recruté et testé les participants, analysé les données, et rédigé l'article.

**Sylvie Belleville** a été impliquée, en tant que directrice de recherche, à chacune des étapes énumérées ci-haut.

**Interindividual differences in attentional control profiles among younger and older  
adults**

Stéphanie Sylvain-Roy & Sylvie Belleville

*Manuscrit en préparation.*



## **Abstract**

This study was aimed at characterizing the interindividual variability in three key attentional control functions (shifting, inhibition, and updating), among older and younger adults. It was also aimed at examining the variables associated with interindividual variability within each age group. Tasks measuring the three attentional control functions, as well as tasks and questionnaires assessing intellectual and health variables, were administered to 75 older adults and 75 younger adults. Cluster analyses were then performed on composite scores reflecting their shifting, inhibition, and updating abilities. Three distinct attentional control profiles were identified for both age groups, but the patterns of variability were strikingly different. Younger adults' profiles showed homogeneous performance across domains and only varied in terms of the magnitude of their performances, whereas older adults' profiles were characterized by uneven levels of performance across domains. Inhibition stood out as the critical attentional control function for distinguishing between the profiles of older adults. Among them, a subgroup of individuals with poorer inhibitory control had more adverse lifestyle characteristics and appeared more cognitively vulnerable. These individuals might be at higher risk of cognitive decline.

## 1. Introduction

Many studies have shown that there is significant interindividual variability in the degree of age-related cognitive changes. Whereas some older adults experience marked cognitive decline, others show minimal changes (e.g. Ylikoski et al., 1999). However, little is known about interindividual differences in the patterns of cognitive strengths and weaknesses in older adults. By differences in cognitive patterns, we refer to the fact that older adults may differ in their relative strengths or weaknesses across various cognitive domains (e.g. Gunstad et al., 2006). Addressing this question has important clinical and theoretical implications. Clinically, the observation of a significant dispersion across cognitive performances is often interpreted as indicating an underlying pathology. Demonstrating that it is rather the expression of normal age-related intra-individual variability would thus have important implications for clinicians involved in geriatric practice. Furthermore, if variability in cognitive patterns represents a significant and meaningful component of normal aging, it will be critical to understand its sources and to better characterize the individuals that belong to different profiles.

Thus, one important question is whether age-related variability in cognitive functions is evenly distributed across cognitive domains – in which case, some older adults would show globally strong performance and others would show globally weak performance – or whether older adults differ in their patterns of strengths and weaknesses across cognitive domains. A few studies have assessed this question by examining performance in large domains of cognition, such as memory, language, and executive functions (Gunstad, et al., 2006; Hilborn, Strauss, Hultsch, & Hunter, 2009; Mitrushina, Uchiyama, & Satz, 1995; Valdois, Joanette, Poissant, Ska, & Dehaut, 1990; Ylikoski, et al., 1999). Three main findings have emerged

from these studies. First, well-delineated clusters of individuals sharing a common cognitive profile were identified. Second, many have identified clusters composed of generally high-performing individuals and clusters of generally low-performing individuals (but see Gunstad, et al., 2006). Third, clusters with an uneven pattern of performance across cognitive domains have also been identified. In such cases, the pattern is most often characterized by a relative weakness in tasks requiring visual planning (for example, block design, copy of the Rey Figure; Mitrushina, et al., 1995; Valdois, et al., 1990; Ylikoski, et al., 1999) or executive functions (Gunstad, et al., 2006). Thus, examination of large cognitive domains suggests that older adults vary both in terms of the degree of cognitive decline and in terms of cognitive patterns. Moreover, there have been reports of increased intra-individual variability with advancing age (Christensen et al., 1999; Hilborn, et al., 2009; Hultsch, MacDonald, & Dixon, 2002; Rabbitt, 1993; Schretlen, Munro, Anthony, & Pearlson, 2003). This indicates that patterns of performance across different cognitive measures tend to become more uneven as people age. Among the various cognitive domains, executive functions seem particularly prone to interindividual differences.

Age-related decline in executive functions is well-documented (see Phillips & Henry, 2008). The executive domain encompasses different dimensions and likely relies on dissociable functions. Miyake et al. (2000) have proposed that executive functions rely on three relatively independent attentional control functions: shifting, inhibition, and updating. Shifting refers to the capacity to alternate the focus of attention between different tasks or between different elements within a task (Monsell, 1996). Inhibition is the ability to refrain from producing a prepotent, or automatic, response (Logan, 1994). Updating involves continuous monitoring and modifying of the contents of working memory (De Beni &

Palladino, 2004; Morris & Jones, 1990). As these are separate functions, interindividual differences in the performance level for each of them might exist. Inhibition is likely to stand out as critical for interindividual variability in older adults. This function indeed explains many of the age-related cognitive deficits (Hasher & Zacks, 1988), and some authors have argued that interindividual variations in inhibitory processes underlie individual differences in performance on a range of complex cognitive tasks (Engle, 2002; Hasher, Lustig, & Zacks, 2007; Kane, Conway, Hambrick, & Engle, 2007). To our knowledge, so far there has been no published study looking at interindividual differences in the finely tuned cognitive processes underlying executive functions or other large domains.

Thus, the present study examined interindividual differences in three key attentional control functions: shifting, inhibition, and updating. Each of these was measured with a series of tasks similar to those used by Miyake et al. (2000) and Sylvain-Roy, Lungu and Belleville (in preparation). Performance on individual tasks was pooled to derive composite scores reflecting each process. Then, cluster analyses were conducted separately for older and younger adults to identify subgroups of individuals with a shared attentional control profile. The three attentional control functions were compared within clusters and between clusters to identify areas of strengths and weaknesses. Based on the literature showing an age-related increase in intra-individual variability, we expected that the attentional control profiles of older adults would be more uneven than those of younger adults. In particular, we expected inhibition to stand out as the attentional control function that would differ the most across clusters of older adults.

Another objective was to assess whether personal characteristics are associated with different attentional control profiles. Lower executive functions have been identified as early

markers of future dementia (Albert, Moss, Tanzi, & Jones, 2001; Backman, Jones, Berger, Laukka, & Small, 2005; Belanger & Belleville, 2009; Belleville, Chertkow, & Gauthier, 2007; Blacker et al., 2007; Chen et al., 2001), in addition to being associated with vascular disorders (Novak & Hajjar, 2010; Villeneuve, Belleville, Massoud, Bocti, & Gauthier, 2009) and with depression (Austin, Mitchell, & Goodwin, 2001). It is therefore possible that age-related variability in the executive domain is actually related to the variability in a range of comorbid conditions among older adults. Adverse physical and/or lifestyle factors might be more prominent in the more cognitively impaired subgroups of older adults (Anstey & Christensen, 2000; Christensen, 2001). Thus, we compared the clusters on their socio-demographic, intellectual, and health characteristics. Since executive control is implicated in many complex cognitive abilities (Strauss, Sherman, & Spreen, 2006), we also compared their performance on neuropsychological tasks (assessing working memory, episodic memory, and processing speed). We expected that the subgroup(s) of individuals with less efficient attentional control would have more vascular risk factors and depressive symptoms than the other subgroups, and that they would show poorer performance on neuropsychological measures of working memory, episodic memory, and processing speed.

## **2. Methods**

### **2.1 Participants**

The study included 150 participants, 75 of which were younger adults and 75 were older adults. Participants were recruited from the local community via advertisements in schools, stores, elderly people centres, or in magazines for seniors. The following conditions resulted in exclusion from the study: dementia or mild cognitive impairment, uncorrected vision or

hearing deficit, presence or history of alcoholism or drug addiction, severe psychiatric disorder, significant cerebrovascular disorder, neurological disorder, mental retardation, concussion or traumatic brain injury, use of a psychotropic drug, presence of a systemic disease known to impair cognition, general anaesthesia in the last six months, and impairment of hand motility. As a screening tool for global cognitive functioning, older adults were administered the Mini Mental State Examination (MMSE : Folstein, Folstein, & McHugh, 1975), and only those with a score of 24 and above were included. This resulted in the exclusion of one participant. The sample was therefore composed of 75 younger adults (age:  $M = 23.7$ ,  $SD = 3.9$ ; education:  $M = 13.6$ ,  $SD = 2.6$ ) and 74 older adults (age:  $M = 70.9$ ,  $SD = 6.1$ ; education:  $M = 14.6$ ,  $SD = 3.5$ ; MMSE:  $M = 29.0$ ,  $SD = 1.1$ ). Younger and older adults did not differ on their level of education,  $t(147) = -1.91$ , *ns*. Written informed consent was obtained from all participants before inclusion in the study.

## **2.2 Materials**

### **2.2.1 Attentional control tasks.**

#### ***Shifting.***

*Plus-minus task.* This is a paper-and-pencil task adapted from Jersild (1927) and Spector and Biederman (1976). Participants were asked to add three with two-digit numbers, subtract three with two-digit numbers, or alternate between adding and subtracting three. Each of the three conditions corresponded to a different column on a sheet of paper, and they were presented one at a time. The total time to complete each condition was recorded, and a global shift cost was calculated by subtracting the mean time to complete the two non-shift conditions from the time to complete the shifting condition.

*Number-letter task.* In this computerized adaptation of Rogers and Monsell's task (1995), participants were asked to alternate their response set with a series of number-letter pairs (e.g., 6B), presented in one of four quadrants on the computer screen. When the pair was presented in one of the top two quadrants, participants' responses had to be based on the number, indicating whether it was odd or even. When the pair was presented in one of the bottom quadrants, the response had to be based on the letter, indicating whether it was a vowel or a consonant. Participants first completed a no-shift condition, in which stimuli were presented on only the top or only the bottom part of the screen. Then, the shifting condition consisted of stimuli alternating between the top and the bottom quadrants of the screen. A global shift cost was computed by subtracting the mean reaction time (RT) for the non-shift blocks from the mean RT to the shifting trials.

*Left-right shifting.* This task consisted of the left-right condition of the task described in the article of Belleville, Bherer, Lepage, Chertkow, and Gauthier (2008). Two digits were presented on a computer screen, one on the right and one on the left side. In the first two blocks, participants were instructed to identify the digit presented on the left (block 1) or on the right side (block 2). In the shifting block, they were required to alternate between identifying the digit presented on the right side and the digit presented on the left side, as indicated by a visual cue presented every five to nine trials. The dependent variable was a global shift cost, computed by subtracting the mean RT for the non-shift blocks from the mean RT for trials requiring a shift.

***Inhibition.***

*Antisaccade task.* In this task adapted from Roberts, Hager and Heron's task (1994), a visual cue was first presented on either the left or the right side of the screen. It was

immediately followed by the target arrow, which always appeared on the side opposite to the cue (e.g., immediately after the cue had appeared on the left, the arrow appeared very briefly on the right). Participants had to indicate the direction in which the arrow pointed and responded on the computer keyboard. The dependent variable was the proportion of correct responses.

*Modified version of the Stroop task.* This is an adapted version of the classical Stroop paradigm (Stroop, 1935), where participants are asked to name the colour of printed words or items. The task comprised control trials (asterisks), incongruent trials (colour words printed in a different ink colour, for example, the word “blue” printed in red ink), and congruent trials (colour words printed in their colour, for example the word “blue” printed in blue ink). All conditions were presented randomly in a single block of trials. Participants responded orally using an RT-recording microphone. Inhibition cost (mean RT for incongruent trials minus the mean RT for control trials, divided by the mean RT for control trials) was used as the dependent variable.

### ***Updating.***

*Keep-track task.* This adapted version of Yntema's task (1963) included a series of visually presented words that belonged to one of four semantic categories. Participants were instructed to pay attention to the semantic category of each word and to report at the end of the series the last word they had seen that belonged to each of the semantic categories. Since words belonging to the different categories were presented randomly, successful completion of the task required continuous updating of the content of their working memory. Six series of 12 words were presented, each series containing three exemplars from four of the six semantic categories. The dependent variable was the proportion of correct responses.



*Tone-monitoring task.* In this computerized adaptation of Larson, Merritt and Williams' task (1988) and Miyake et al.'s (2000) task, a series of tones with either a high, a medium, or a low pitch were presented randomly. Participants were instructed to keep track of the number of tones presented for each pitch level and to press on the appropriate key on the computer keyboard when they had heard three tones for any given pitch level. The dependent variable was the proportion of correct responses.

*Letter updating task.* Series of consonants were presented visually, and participants were asked to orally recall the last consonants of the series. The number of consonants to be recalled corresponded to the participant's consonant span (evaluated prior to the task), minus one item. Series of four different lengths (participant's span minus one item, plus one item, plus three items, or plus five items) were presented in random order. The dependent variable was the proportion of correct responses.

### **2.2.2 Intellectual measures.**

*Crystallized intelligence.* Crystallized intelligence was measured with the Similarities subtest of the Wechsler Adult Intelligence Scale (WAIS-III: Wechsler, 1997), using the scaled score.

*Fluid intelligence.* A participant's level of fluid intelligence was estimated using their scaled score on the Digit-symbol coding subtest of the Wechsler Adult Intelligence Scale (WAIS-III: Wechsler, 1997).

*Global cognition.* The Montreal Cognitive Assessment (MoCA: Nasreddine et al., 2005) is a scale evaluating different aspects of cognition: visuospatial functions, executive functions, naming, memory, attention, language, abstraction, and orientation, and it was used to measure global cognition.

### **2.2.3 Health variables,**

**Health.** The Charlson Comorbidity Scale (Charlson, Pompei, Ales, & MacKenzie, 1987) was used to measure health in older participants.

**Vascular risk factors.** The number of vascular risk factors presented by older participants was assessed using a homemade questionnaire, in which one point was given for each of the following conditions: carotid murmur, hyperlipidemia/hypercholesterolemia, hypotension, hypertension, diabetes, transient cerebral ischemia, arrhythmia or atrial fibrillation, smoking currently or within the past five years. Participants therefore had a score out of nine. For experimental reasons, this was collected for only a subset of the group (45 older adults). However, a series of independent-samples *t*-tests revealed that those 45 adults did not differ from the 28 older adults who were not administered this questionnaire, in terms of age, education, MMSE score, MoCA score, health, depression, crystallized intelligence and fluid intelligence.

**Depression.** To evaluate the presence of depressive symptoms, the Beck Depression Inventory (Beck, Steer, Ball, & Ranieri, 1996) was used for younger adults, and the 15-item version of the Geriatric Depression Scale (Yesavage et al., 1982) was used for older adults.

### **2.2.4 Neuropsychological tests.**

#### ***Working memory.***

*Adapted version of the Brown-Peterson task* (Belleville, Peretz, & Malenfant, 1996). In this task, participants were asked to maintain three consonants in their working memory while performing a simple addition task (add 1 to random numbers) during a short delay (0, 10, 20, or 30 seconds). Three practice trials were followed by 12 experimental trials, three per delay.

Delays were presented in a pre-randomized order. Consonants and numbers were presented orally by the examiner, at a rate of one item per second. Participants responded orally to the additions task. An auditory signal instructed them to recall the consonants by writing them down in the order of presentation. The total number of consonants correctly recalled was used as the critical dependent variable for this task.

*Reading span* (De Ribaupierre & Ludwig, 2003). This is a computerized task where participants read series of semantically correct and anomalous sentences. They were asked to make a yes/no semantic plausibility judgment following each sentence and to recall the last word of each sentence at the end of the series. Series varied in length from two to five sentences, and there were four trials per series length. Participants responded orally for the word recall and by pressing on the computer keyboard for the plausibility judgment. The total number of words correctly recalled was selected as the critical dependent variable for the reading span task.

*Alpha span* (Belleville, Rouleau, & Caza, 1998). Participants recalled 10 series of words in the same order as they were presented and 10 series of words in their alphabetical order. The number of words to be recalled in each series corresponded to the participant's word span, as measured just prior to the task. The series of words were read aloud by the examiner, and participants gave their response orally. The proportion of words correctly recalled in both the direct recall and the alphabetical recall conditions was used as the critical dependent variable in the predictive model for the alpha span task.

### ***Episodic memory.***

*Free-recall/Cued-recall 16 items.* Episodic memory was evaluated using the free-recall/cued-recall task developed by Van der Linden and collaborators (2004), on the basis of Grober and Buschke's procedure (1987). The dependent variable was the number of words freely recalled at the third trial.

### **Processing speed.**

*Choice reaction time.* In this computerized task (Bherer & Belleville, 2004), participants had to indicate as fast as possible whether a black circle was presented on the left or right side of the screen by pressing the appropriate button on a response box. The dependent variable was the mean RT for correct responses.

*Digit comparison.* Pairs of digits were visually presented on a computer screen, and participants indicated as fast as possible whether the two digits were identical or different by pressing the appropriate key on the computer keyboard. There were 30 trials, half of which were identical. The mean RT for correct responses was used as the dependent variable.

## **2.3 Procedure**

Participants were tested individually over two sessions of approximately two hours each. There was an interval of about one week between the two testing sessions. Exceptionally, a few participants had to come for a third testing session, when it had not been possible for them to complete all tasks within the first two sessions. The order of presentation of the different tasks and/or conditions was the same for all participants, to allow for inter-individual comparisons. The order in which tasks were administered was first pseudo-randomized so that no tasks measuring the same construct followed each other. The order of experimental tests for the first session was as follows: left-right shifting, antisaccade, tone-monitoring, modified

version of the Stroop task, alpha span, adapted version of the Brown-Peterson task. The order of tests for the second session was as follows: number-letter, keep-track, plus-minus, letter updating, reading span. The following tasks were presented using E-Prime software (Schneider, Eschman, & Zuccolotto, 2002): reading span, number-letter task, antisaccade, modified version of the Stroop, keep-track, tone monitoring, and letter updating. PsyScope software (Cohen, MacWhinney, Flatt, & Provost, 1993) was used for the left-right shifting task.

## **2.4 Statistical analyses**

### **2.4.1 Preliminary data analyses.**

RT (for the number-letter task and the left-right shifting task) and proportion of correct responses (for the antisaccade task, modified version of the Stroop task, keep-track task, tone-monitoring task, and letter-updating task) were used as dependent variables. RT trials that were more than 3 SDs away from an individual's mean RT were discarded. RTs were then log-transformed. Arcsine transformations were applied to proportion variables, to reduce ceiling and floor effects (Judd, McClelland, & Ryan, 2009). Furthermore, the directionality was inverted for some of the variables so that higher values always indicated better performance. In order for data with different scale values to be comparable, scores on all attentional control tasks were standardized as  $z$  scores, on the basis of the mean and standard deviation of each group. This was performed separately for younger and older adults. Composite scores were then created for each attentional control function, based on the mean  $z$  score from the tasks measuring that function. Thus, a shifting composite score, an inhibition composite score, and an updating composite score were derived from the performance of each

participant on the tasks associated with each of those functions. A processing speed composite score was also derived from the performance of each participant on the Choice reaction time and on the Digit comparison tasks.

#### **2.4.2 Identification of attentional control profiles.**

In order to identify subgroups of participants according to their attentional control profiles, cluster analyses were conducted on participants' shifting, inhibition, and updating composite scores (Aldenderfer & Blashfield, 1984), using the Clustan Graphics program, version 5.27. Classification of cases was based on the squared Euclidian distance as a coefficient of similarity, and the Ward's method of classification (Ward, 1963) was adopted. The k-means clustering procedure of relocation was then applied in order to ensure that this three-cluster solution was stable. This was done separately for younger and older adults.

Within each cluster, the different attentional control composite scores were compared using a one-factor (attentional control function: shifting, inhibition, and updating) repeated-measures ANOVA. We then made post-hoc pairwise comparisons with the Bonferroni correction, when a significant effect of attentional control function was found. This was used to identify areas of relative strengths or weaknesses within each cluster. Separately for younger and older adults, we then performed MANOVAs to compare clusters on the basis of the three attentional control composite scores. This analysis indicated whether the clusters differed as to their attentional control abilities (the combination of their shifting, inhibition, and updating composite scores). In the case of a significant difference found at this level, examination of the univariate  $F$  values then identified which of the three attentional control functions contributed significantly to this difference between the clusters.

In order to further characterize the individuals belonging to each attentional control profile, we compared their health, intellectual capacities, and performance on neuropsychological tests. To reduce the number of comparisons, we compared the cluster(s) showing strengths in attentional control with the cluster(s) whose attentional control was poorer, using *t*-tests.

### **3. Results**

#### **3.1 Preliminary data analysis**

Examination of the distributions for each dependent variable revealed only three outliers: one participant for the plus-minus task, one for the left-right shifting task, and one for the Stroop task. Those three data points were replaced by the value that corresponded to three standard deviations away from the mean. This procedure aids in normalizing the data, while still preserving information about the direction in which the extreme score “pulled” the mean (Field, 2005). After replacement of those three data points, skewness and kurtosis were examined for each dependent variable. On the basis of Kline’s (1998) guidelines, all distributions were considered normal. No multivariate outliers were found based on the Mahalanobis distance calculation. Three younger adults and one older adult did not complete any of the tasks used in the computation of the inhibition score. They were therefore removed from the sample, and all subsequent analyses were performed on the remaining 72 younger adults and 73 older adults.

#### **3.2 Characterization of the attentional control profiles**

##### **3.2.1 Older adults.**

A three-cluster solution appeared to maximize the discriminating power among the clusters and to provide relevant clinical interpretability. The attentional control profiles of the clusters are shown in Figure 1. Cluster 1 (*Inhibition+*) consisted of 27 participants. In this cluster, there was a significant Function effect,  $F(2,52) = 26.074, p < .001, \eta^2 = .50$ , and post-hoc tests indicated that inhibition was superior to shifting ( $p < .001$ ) and updating ( $p < .001$ ), whereas the latter two did not differ ( $p = .57$ ). Cluster 2 (*Updating+*) contained 22 older adults. This cluster also showed a significant Function effect,  $F(2,42) = 6.756, p < .01, \eta^2 = .24$ , and in this case, it was due to stronger updating capacities relative to inhibition abilities ( $p < .01$ ), whereas shifting was equivalent to inhibition ( $p = .44$ ) and updating ( $p = .15$ ). Finally, cluster 3 (*Inhibition-*) comprised 24 participants. The Function effect was also significant in this cluster,  $F(2,46) = 7.244, p < .01, \eta^2 = .24$ , and post-hoc tests revealed that inhibition was significantly poorer than both shifting ( $p < .05$ ) and updating ( $p < .05$ ), which were equivalent ( $p = .45$ ).

The MANOVA indicated that the Cluster variable had a significant effect on attentional control, defined as the combined dependent variables (shifting, inhibition, and updating composite scores), Wilks'  $\Lambda = .167, F(6,136) = 32.814, p < .001, \eta^2 = .59$ , and explained 59% of the variance. Given the significance of the overall test, the univariate main effects were examined. A significant Cluster effect was found for all three attentional control functions, and post-hoc Tukey analyses were conducted to find out where the differences were. There was a Cluster effect on updating [ $F(2,70) = 51.770, p < .001, \eta^2 = .60$ ], where the *Updating+* cluster showed better performance than the two other clusters. The Cluster effect was also significant on inhibition, [ $F(2,70) = 43.047, p < .001, \eta^2 = .55$ ], as the *Inhibition+* cluster showed better performance than the *Updating+* cluster, which in turn was better than the



*Inhibition-* cluster. Finally, there was a Cluster effect on shifting [ $F(2,70) = 9.680, p < .001, \eta^2 = .22$ ], with *Updating+* showing higher performance than the other two clusters, whose shifting scores were equivalent.

Means, standard deviations, as well t-test values for the intellectual, health, and neuropsychological variables are presented in Table 1. Interestingly, clusters did not differ in terms of their age and educational level. Participants in the *Inhibition-* cluster showed lower global cognition ( $t = 2.590, p < .01$ ), more depressive symptoms ( $t = -1.664, p = .05$ ), and poorer working memory (reading span,  $t = 2.005, p < .05$ ; alpha span,  $t = 2.171, p < .05$ ) than those in the *Inhibition+* cluster. They also showed lower global cognition ( $t = 2.912, p < .01$ ), lower Similarities score ( $t = 1.960, p < .05$ ), more vascular risk factors ( $t = -1.686, p = .05$ ), more depressive symptoms ( $t = -2.032, p < .05$ ), poorer episodic memory ( $t = 2.373, p < .05$ ), slower processing speed ( $t = 2.512, p < .05$ ), and poorer working memory (reading span,  $t = 3.184, p < .01$ ; Brown-Peterson,  $t = 2.224, p < .05$ ) than those in the *Updating+* cluster.

### **3.2.2 Younger adults.**

A three-cluster solution appeared to maximize the discriminating power among the clusters and to provide relevant clinical interpretability. The attentional control profiles of each cluster are shown in Figure 2. For a clearer description of the clusters, between-cluster comparisons will be presented first here. The MANOVA indicated that the Cluster variable had a significant impact on attentional control, defined as the combined dependent variables (shifting, inhibition and updating composite scores), Wilks'  $\Lambda = .174, F(6,134) = 31.169, p < .001, \eta^2 = .58$ , and explained 58% of the variance. Given the significance of the overall test, the univariate main effects were examined. A significant Cluster effect was found for all three attentional control composite scores, and post-hoc Tukey analyses were conducted to find out

where the differences were. Clusters indeed differed in terms of their shifting abilities [ $F(2,69) = 92.481, p < .001, \eta^2 = .73$ ], as the composite score of the first cluster (*Overall+/Shifting+*) was significantly higher than the second cluster (*Overall+/-*), which was, in turn, better than the third cluster (*Overall-*). It was also the case of inhibition abilities [ $F(2,69) = 30.639, p < .001, \eta^2 = .47$ ], where the same pattern was observed, with the *Overall+/Shifting+* cluster performing significantly better than the *Overall+/-* cluster, which performed better than the *Overall-* cluster. Regarding updating, there was a significant difference between clusters [ $F(2,69) = 5.778, p < .01, \eta^2 = .14$ ], the abilities of the *Overall-* cluster being significantly worse than the other two clusters, which were equivalent.

The *Overall+/ Shifting+* therefore comprised 29 participants with globally good attentional control. In this group, there was a significant Function effect  $F(2,56) = 6.717, p < .01, \eta^2 = .19$ , and post-hoc tests indicated that shifting was superior to updating ( $p < .01$ ), whereas inhibition did not differ from shifting ( $p = .87$ ) or updating ( $p = .10$ ). The *Overall+/-* cluster comprised 35 participants with globally average performances compared to the rest of the sample. In this group, there was no significant Function effect,  $F(2,68) = 2.920, ns$ . The *Overall-* consisted of 8 participants with globally low performances compared to the rest of the sample, and the Function effect did not reach significance in this group,  $F(2,14) = 1.247, ns$ .

Means and standard deviations for the intellectual, health, and neuropsychological characteristics of the participants belonging to each cluster are presented in Table 2, as well as the results of the t-tests. Compared to the *Overall-* cluster, participants in the *Overall+/Shifting+* cluster had significantly higher scores for the Similarities subtest ( $t = 2.132, p < .05$ ), the Digit-symbol coding subtest ( $t = 3.702, p < .01$ ), the episodic memory

measure ( $t = 2.672, p < .05$ ), the processing speed measure ( $t = 3.599, p < .01$ ), and two measures of working memory [alpha span ( $t = 2.413, p < .05$ ), and reading span ( $t = 2.274, p < .05$ )].

#### 4. Discussion

The main objective of the present study was to characterize the attentional control profiles of older adults and younger adults. In older adults, we identified three distinct clusters characterized by uneven levels of performance across domains. One (*Inhibition+*) consisted of individuals with a relative strength in inhibition. A second cluster (*Updating+*) comprised participants with a particular strength in updating. Individuals in the third cluster showed a relative weakness in inhibition (*Inhibition-*). Three distinct clusters were also found among younger adults, but the profiles were strikingly different from those identified in older adults, as the three clusters showed homogeneous performance across domains and only varied in terms of the magnitude of their performance. One cluster had globally good attentional control functions (*Overall+ / Shifting+*), the second cluster's attentional control functions were all average relative to the rest of the sample (*Overall+/-*), whereas the third cluster showed globally poorer attentional control (*Overall-*). Thus, three major findings emerged from those results and will be discussed further. First, interindividual variability in younger adults is quantitative, and the levels of performance on the attentional control functions are alike within a cluster, whereas they are characterized by contrasted areas of strengths or weaknesses in older adults. Second, and as predicted, inhibition is critical in distinguishing between the attentional control profiles of older adults. Third, older adults with a relative weakness in inhibition are more cognitively frail and have more adverse lifestyle characteristics than do individuals belonging to the other two attentional control profiles.

One important finding is the fact that the attentional control functions show more dispersion in older than younger adults. In all three clusters of older adults, significant differences were found between the attentional control functions. Thus, each cluster shows a relative strength or weakness in at least one of the attentional control functions. This indicates that age-related changes do not impact evenly on all functions for a given individual, and that there is significant interindividual variability in the domains that are impaired by aging. Most studies interested in the large cognitive domains have identified subgroups of older adults that differ quantitatively rather than qualitatively in patterns of performance. However, they have all identified at least one subgroup showing relative strengths or weaknesses in at least one domain, often the executive domain (Hilborn, et al., 2009; Mitrushina, et al., 1995; Ritchie, Leibovici, Ledesert, & Touchon, 1996; Ylikoski, et al., 1999). For instance, subgroups of older adults that differ qualitatively rather than quantitatively have been identified by Gunstad et al. (2006) with tasks that measure different aspects of fluid cognition (e.g., manipulation of information in working memory, fluency, switching of attention, speed). Qualitative differences between subgroups therefore appear more likely to emerge among fluid abilities, such as the attentional control functions studied here.

We did not observe similar qualitative differences between the subgroups of younger adults. This difference between younger and older adults is coherent with the many reports showing increased intra-individual variability among large cognitive domains with increasing age (Christensen, et al., 1999; Hilborn, et al., 2009; Hultsch, et al., 2002; Rabbitt, 1993; Schretlen, et al., 2003; but see Lindenberger & Baltes, 1997; Rapp, Schnaider-Beeri, Sano, Silverman, & Haroutunian, 2005). This is typically interpreted as reflecting interindividual differences in the distribution of age-related neuropathological changes (Mitrushina, et al.,

1995; Rabbitt, 1993). Our results suggest that this phenomenon is also present at the level of finely tuned attentional control functions. This is coherent with the fact that these functions are relatively independent (Miyake et al., 2000) and that they rely on different brain networks (Collette & Van der Linden, 2002). Importantly, the present study shows that the expression of interindividual variability in normal aging is associated with personal characteristics linked to lifestyle, such as vascular risk factors, depressive symptoms, and the level of crystallized intelligence and global cognitive functioning. This is consistent with the finding of increased dispersion with age. Environmental factors have a cumulative effect throughout life, and if some of these factors are associated with a particular cognitive profile, the association is expected to increase with age in a dose-response manner. This might explain the larger intra-individual variability observed in older adults, relative to younger adults.

As expected, inhibition is the function that differentiated the most between clusters of older adults, and the only function on which the three clusters differed. This finding would support theories that consider much of age-related cognitive decline as reflecting a more basic impairment in inhibitory processes (Hasher & Zacks, 1988). It raises the possibility that inhibition might be more sensitive than shifting or updating to age-related changes in the brain, and that the variability reflects interindividual differences in the age-related cerebral changes. The finding that the inhibition composite is correlated to MoCA in older adults is compatible with this interpretation. It is, however, difficult to reconcile it with the fact that MoCA is also associated with the shifting composite. Differences in inhibition might also express interindividual variability in brain reserve capacity.

Older adults with a relative weakness in inhibition indeed were more cognitively frail and had more adverse lifestyle characteristics than individuals belonging to the other

attentional control profiles. They had lower global cognitive functioning, processing speed, working memory, episodic memory, and crystallized intelligence. They also showed more depressive symptoms and vascular risk factors. Interestingly, they did not differ from the other clusters in terms of age, education, MMSE scores, and general self-reported health. While these factors are known to account for a part of the interindividual variability in global cognitive domains, it might not be the case for finely tuned attentional control functions. The result obtained with education is in line with the suggestion that education has a protective effect on crystallized abilities, but not on fluid cognition (Anstey & Christensen, 2000; Christensen, 2001). Finally, one last possible interpretation regarding inhibition variability is that poorer inhibition might reflect a subgroup of older individuals who may be more at risk of progressing to dementia. It has indeed been shown that inhibition deficits are found very early in Alzheimer's disease, and even in its pre-clinical stages (Belanger & Belleville, 2009; Belanger, Belleville, & Gauthier, 2010; Belleville, Rouleau, & Van der Linden, 2006; Collette, Schmidt, Scherrer, Adam, & Salmon, 2009). Longitudinal studies would obviously be necessary to confirm such a hypothesis.

Moreover, the subgroup of older adults with a relative strength in updating may comprise individuals who are more able to compensate for the age-related changes in the brain. When compared with the subgroup with a relative weakness in inhibition, these individuals with strong updating abilities also had a higher level of global cognitive functioning and better performances on measures of working memory, episodic memory, and processing speed.

In sum, subgroups of individuals showing different attentional control profiles can be identified in older and younger adults, and the profiles of older adults are characterized by

more intra-individual variability across the attentional control functions. These findings have a number of implications at the clinical, preventive, and theoretical level. First, they indicate that older adults should not be treated as a homogeneous group, since different profiles of attentional control exist. Among them, a subgroup of individuals with lower inhibition capacities appear to have many of markers of cognitive vulnerability and might thus be at higher risk of cognitive decline. Empirically, it has consequences, because research on cognitive aging is often based on comparisons between the mean performances of older and younger adults, with little consideration for the heterogeneity that exists between individuals. Clinically, it suggests that cognitively frail individuals can be identified and can present with a relatively coherent cognitive and clinical profile.

There are remaining issues to explore. For instance, the present study did not include measures of health for younger adults; it would be relevant to examine whether health variables are associated with the attentional control profiles. Future research will also be needed to determine whether these subgroups are associated with individual differences in neuroanatomical or functional brain changes.

## References

- Albert, M. S., Moss, M. B., Tanzi, R., & Jones, K. (2001). Preclinical prediction of AD using neuropsychological tests. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 7(5), 631-639.
- Aldenderfer, M. S., & Blashfield, R. K. (1984). *Cluster Analysis*. Beverly Hills, CA: Sage Publications.
- Anstey, K., & Christensen, H. (2000). Education, activity, health, blood pressure and apolipoprotein E as predictors of cognitive change in old age: A review. *Gerontology*, 46(3), 163-177.
- Austin, M. P., Mitchell, P., & Goodwin, G. M. (2001). Cognitive deficits in depression: possible implications for functional neuropathology. *British Journal of Psychiatry*, 178, 200-206.
- Backman, L., Jones, S., Berger, A. K., Laukka, E. J., & Small, B. J. (2005). Cognitive impairment in preclinical Alzheimer's disease: a meta-analysis. *Neuropsychology*, 19(4), 520-531.
- Beck, A. T., Steer, R. A., Ball, R., & Ranieri, W. (1996). Comparison of Beck Depression Inventories -IA and -II in psychiatric outpatients. *Journal of Personality Assessment*, 67(3), 588-597.
- Belanger, S., & Belleville, S. (2009). Semantic inhibition impairment in mild cognitive impairment: a distinctive feature of upcoming cognitive decline? *Neuropsychology*, 23(5), 592-606.



- Belanger, S., Belleville, S., & Gauthier, S. (2010). Inhibition impairments in Alzheimer's disease, mild cognitive impairment and healthy aging: effect of congruency proportion in a Stroop task. *Neuropsychologia*, 48(2), 581-590.
- Belleville, S., Bherer, L., Lepage, E., Chertkow, H., & Gauthier, S. (2008). Task switching capacities in persons with Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *Neuropsychologia*, 46(8), 2225-2233.
- Belleville, S., Chertkow, H., & Gauthier, S. (2007). Working memory and control of attention in persons with Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *Neuropsychology*, 21(4), 458-469.
- Belleville, S., Peretz, I., & Malenfant, D. (1996). Examination of the working memory components in normal aging and in dementia of the Alzheimer type. *Neuropsychologia*, 34(3), 195-207.
- Belleville, S., Rouleau, N., & Caza, N. (1998). Effect of normal aging on the manipulation of information in working memory. *Memory and Cognition*, 26(3), 572-583.
- Belleville, S., Rouleau, N., & Van der Linden, M. (2006). Use of the Hayling task to measure inhibition of prepotent responses in normal aging and Alzheimer's disease. *Brain and Cognition*, 62(2), 113-119.
- Bherer, L., & Belleville, S. (2004). Age-related differences in response preparation: the role of time uncertainty. *Journal of Gerontology B: Psychological Science and Social Science*, 59(2), P66-74.
- Blacker, D., Lee, H., Muzikansky, A., Martin, E. C., Tanzi, R., McArdle, J. J., et al. (2007). Neuropsychological measures in normal individuals that predict subsequent cognitive decline. *Archives of Neurology*, 64(6), 862-871.

- Charlson, M. E., Pompei, P., Ales, K. L., & MacKenzie, C. R. (1987). A new method of classifying prognostic comorbidity in longitudinal studies: development and validation. *Journal of Chronic Diseases, 40*(5), 373-383.
- Chen, P., Ratcliff, G., Belle, S. H., Cauley, J. A., DeKosky, S. T., & Ganguli, M. (2001). Patterns of cognitive decline in presymptomatic Alzheimer disease: a prospective community study. *Archives of General Psychiatry, 58*(9), 853-858. doi: yoa20218 [pii]
- Christensen, H. (2001). What cognitive changes can be expected with normal ageing? *Australian and New Zealand Journal of Psychiatry, 35*(6), 768-775.
- Christensen, H., Mackinnon, A. J., Korten, A. E., Jorm, A. F., Henderson, A. S., & Jacomb, P. (1999). Dispersion in cognitive ability as a function of age: A longitudinal study of an elderly community sample. *Aging, Neuropsychology and Cognition, 6*(3), 214-228.
- Cohen, J. D., MacWhinney, B., Flatt, M., & Provost, J. (1993). PsyScope: A new graphic interactive environment for designing psychology experiments. *Behavioral Research Methods, Instruments, and Computers, 25*(2), 257-271.
- Collette, F., Schmidt, C., Scherrer, C., Adam, S., & Salmon, E. (2009). Specificity of inhibitory deficits in normal aging and Alzheimer's disease. *Neurobiology of Aging, 30*(6), 875-889.
- Collette, F., & Van der Linden, M. (2002). Brain imaging of the central executive component of working memory. *Neuroscience and Biobehavioral Review, 26*(2), 105-125.
- De Beni, R., & Palladino, P. (2004). Decline in working memory updating through ageing: intrusion error analyses. *Memory, 12*(1), 75-89.
- De Ribaupierre, A., & Ludwig, C. (2003). Age differences and divided attention: Is there a general deficit? *Experimental Aging Research, 29*(1), 79-105.

- Engle, R. W. (2002). *Working memory capacity as executive attention: Current Directions in Psychological Science* Vol 11(1) Feb 2002, 19-23.
- Field, A. (2005). *Discovering statistics using SPSS, Second edition*. Thousand Oaks, California: Sage Publications Inc.
- 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. *Journal of Psychiatric Research, 12*(3), 189-198.
- Grober, E., & Buschke, H. (1987). Genuine memory deficits in dementia. *Developmental Neuropsychology, 3*, 13-36.
- Gunstad, J., Paul, R. H., Brickman, A. M., Cohen, R. A., Arns, M., Roe, D., et al. (2006). Patterns of cognitive performance in middle-aged and older adults: A cluster analytic examination. *Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology, 19*(2), 59-64.
- Hasher, L., Lustig, C., & Zacks, R. T. (2007). Inhibitory mechanisms and the control of attention. In A. R. A. Conway, C. Jarrold, M. J. Kane, A. Miyake & J. Towse (Eds.), *Variation in working memory* (pp. 227-249). New York, NY: Oxford University Press.
- Hasher, L., & Zacks, R. T. (1988). Working memory, comprehension, and aging: A review and a new view. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (Vol. 22, pp. 193-225). San Diego, CA: Academic Press.
- Hilborn, J. V., Strauss, E., Hultsch, D. F., & Hunter, M. A. (2009). Intraindividual variability across cognitive domains: investigation of dispersion levels and performance profiles in older adults. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, 31*(4), 412-424.

- Hultsch, D. F., MacDonald, S. W., & Dixon, R. A. (2002). Variability in reaction time performance of younger and older adults. *Journal of Gerontology B : Psychological Science and Social Science*, 57(2), P101-115.
- Jersild, A. T. (1927). Mental set and shift. *Archives of Psychology, Whole No. 89*.
- Judd, C. M., McClelland, G. H., & Ryan, C. S. (2009). *Data analysis: A model comparison approach (2nd ed.)*. New York, NY: Routledge/Taylor & Francis Group; US.
- Kane, M. J., Conway, A. R. A., Hambrick, D. Z., & Engle, R. W. (2007). Variation in working memory capacity as variation in executive attention and control. In A. R. A. Conway, C. Jarrold, M. J. Kane, A. Miyake & J. Towse (Eds.), *Variation in working memory*. New York: Oxford University Press.
- Kline, R. B. (1998). *Principles and practice of structural equation modeling*. New York: Guilford Press.
- Larson, G. E., Merritt, C. R., & Williams, S. E. (1988). Information processing and intelligence: Some implications of task complexity. *Intelligence*, 12(2), 131-147.
- Lindenberger, U., & Baltes, P. B. (1997). Intellectual functioning in old and very old age: cross-sectional results from the Berlin Aging Study. *Psychology and Aging*, 12(3), 410-432.
- Logan, G. D. (1994). On the ability to inhibit thought and action: A user's guide to the stop signal paradigm. In D. D. T. H. C. (Eds.). (Ed.), *Inhibitory processes in attention, memory, and language* (pp. 189-239). San Diego, CA: Academic Press.
- Mitrushina, M., Uchiyama, C., & Satz, P. (1995). Heterogeneity of cognitive profiles in normal aging: implications for early manifestations of Alzheimer's disease. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 17(3), 374-382.

- 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. *Cognitive Psychology*, *41*(1), 49-100.
- Monsell, S. (1996). Control of mental processes. In V. Bruce (Ed.), *Unsolved mysteries of the mind: Tutorial essays in cognition* (pp. 93-148). Oxford, England: Erlbaum (Uk) Taylor & Francis, Publ.
- Morris, N., & Jones, D. M. (1990). Memory updating in working memory: The role of the central executive. *British Journal of Psychology*, *81*(2), 111-121.
- Nasreddine, Z. S., Phillips, N. A., Bedirian, V., Charbonneau, S., Whitehead, V., Collin, I., et al. (2005). The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: a brief screening tool for mild cognitive impairment. *Journal of the American Geriatric Society*, *53*(4), 695-699.
- Novak, V., & Hajjar, I. (2010). The relationship between blood pressure and cognitive function. *Nature Reviews: Cardiology*, *7*(12), 686-698.
- Phillips, L. H., & Henry, J. D. (2008). Adult aging and executive functioning. In V. Anderson, R. Jacobs & P. J. Anderson (Eds.), *Executive functions and the frontal lobes: A lifespan perspective* (pp. 57-79). New York: Taylor & Francis Group.
- Rabbitt, P. (1993). Does it all go together when it goes? The Nineteenth Bartlett Memorial Lecture. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *46A*(3), 385-434.
- Rapp, M. A., Schnaider-Beeri, M., Sano, M., Silverman, J. M., & Haroutunian, V. (2005). Cross-domain variability of cognitive performance in very old nursing home residents and community dwellers: relationship to functional status. *Gerontology*, *51*(3), 206-212.

- Ritchie, K., Leibovici, D., Ledesert, B., & Touchon, J. (1996). A typology of sub-clinical senescent cognitive disorder. *British Journal of Psychiatry, 168*(4), 470-476.
- Roberts, R. J., Hager, L. D., & Heron, C. (1994). Prefrontal cognitive processes: Working memory and inhibition in the antisaccade task. *Journal of Experimental Psychology: General, 123*(4), 374-393.
- Rogers, R. D., & Monsell, S. (1995). Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology: General, 124*(2), 207-231.
- Schneider, W., Eschman, A., & Zuccolotto, A. (2002). E-Prime User's Guide. Pittsburgh: Psychology Software Tools Inc.
- Schretlen, D. J., Munro, C. A., Anthony, J. C., & Pearlson, G. D. (2003). Examining the range of normal intraindividual variability in neuropsychological test performance. *Journal of the International Neuropsychological Society, 9*(6), 864-870.
- Spector, A., & Biederman, I. (1976). Mental set and mental shift revisited. *American Journal of Psychology, 89*, 669-679.
- Strauss, E., Sherman, E. M. S., & Spreen, O. (2006). *A compendium of neuropsychological tests: Administration, norms and commentary*. New York: Oxford University Press.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology, 18*, 643-662.
- Valdois, S., Joanette, Y., Poissant, A., Ska, B., & Dehaut, F. (1990). Heterogeneity in the cognitive profile of normal elderly. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, 12*(4), 587-596.
- Van Der Linden, M., Coyette, F., Poitrenaud, J., Kalafat, M., Calicis, F., Wyns, C., et al. (2004). L'épreuve de rappel libre/rappel indicé à 16 items (RL/RI-16). In M. Van Der

- Linden (Ed.), *L'évaluation des troubles de la mémoire: Présentation de quatre tests de mémoire épisodique (avec leur étalonnage)*: Solal.
- Villeneuve, S., Belleville, S., Massoud, F., Bocti, C., & Gauthier, S. (2009). Impact of vascular risk factors and diseases on cognition in persons with mild cognitive impairment. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 27(4), 375-381.
- Ward, J. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of American Statistical Association*, 58, 236-244.
- Wechsler, D. (1997). *Administration and scoring manual: Wechsler Adult Intelligence Scale, Third Edition*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.
- Yesavage, J. A., Brink, T. L., Rose, T. L., Lum, O., Huang, V., Adey, M., et al. (1982). Development and validation of a geriatric depression screening scale: a preliminary report. *Journal of Psychiatric Research*, 17(1), 37-49.
- Ylikoski, R., Ylikoski, A., Keskivaara, P., Tilvis, R., Sulkava, R., & Erkinjuntti, T. (1999). Heterogeneity of cognitive profiles in aging: successful aging, normal aging, and individuals at risk for cognitive decline. *European Journal of Neurology*, 6(6), 645-652.
- Yntema, D. B. (1963). Keeping track of several things at once. *Human Factors*, 5(1), 7-17.

Table 1

*Older Adults' Means and Standard Deviations (in Parenthesis) for Demographic, Intellectual, and Health Variables, by Cluster*

	Cluster 1 ( <i>Inhibition+</i> )	Cluster 2 ( <i>Updating+</i> )	Cluster 3 ( <i>Inhibition-</i> )	Differences	<i>p</i>
N (Women/Men)	27 (14/13)	22 (15/7)	24 (17/7)		
Age	71.9 (5.2)	68.6 (6.6)	71.7 (6.2)		<i>ns</i>
Education	14.1 (3.3)	15.2 (2.8)	14.2 (4.1)		<i>ns</i>
MMSE	29.0 (1.0)	29.2 (1.1)	28.8 (1.3)		<i>ns</i>
Intellectual Measures					
MoCA	27.9 (2.2)	28.1 (1.9)	26.2 (2.1)	<sup>1, 2</sup>	<.01
Crystallized Int.	10.1 (2.6)	10.6 (2.1)	9.5 (2.4)	<sup>2</sup>	<.05
Fluid Int.	12.0 (2.3)	12.4 (2.4)	12.1 (2.6)		<i>ns</i>
Health Variables					
Health	0.6 (0.8)	0.6 (0.8)	0.6 (0.9)		<i>ns</i>
Vascular	1.1 (1.0)	0.7 (1.2)	1.5 (1.2)	<sup>2</sup>	=.05
GDS	1.6 (1.8)	1.3 (1.6)	2.5 (2.3)	<sup>1, 2</sup>	=.05
Neuropsychological Measures					
Brown-Peterson	30.9 (3.9)	33.1 (3.2)	30.5 (4.8)	<sup>2</sup>	<.05
Reading Span	75.0 (13.5)	79.6 (12.1)	67.2 (13.8)	<sup>1,2</sup>	<.05
Alpha Span	76.8 (13.6)	70.0 (10.6)	66.5 (18.8)	<sup>1</sup>	<.05
Episodic Memory	11.3 (2.1)	12.8 (2.3)	11.1 (2.4)	<sup>2</sup>	<.05
Processing Speed	-0.03 (0.87)	0.36 (0.76)	-0.28 (0.95)	<sup>2</sup>	<.01

*Note.* MMSE = Mini-Mental State Examination; MoCA = Montreal Cognitive Assessment Test; Crystallized intelligence = Scaled Score on the WAIS-III Similarities Subtest; Fluid intelligence = Scaled score on the WAIS-III Digit-symbol coding subtest; GDS = Geriatric Depression Scale; Brown-Peterson = Total Number of Letters Correctly Recalled; Reading Span = Total Number of Words Correctly Recalled; Alpha Span = Percentage of Correct Responses in the Alphabetical Recall Condition; Episodic Memory = Correct Responses on the Third Free Recall for the Free-Recall/Cued-Recall Procedure; Processing Speed = Composite Score Based on the Mean from the Choice Reaction Time Task and the Digit Comparison Task. <sup>1</sup> Significant difference between Clusters 1 and 3. <sup>2</sup> Significant difference between Clusters 2 and 3.



Table 2

*Young Adults' Means and Standard Deviations (in Parenthesis) for Demographic, Intellectual, and Health Variables, by Cluster*

	Cluster 1 (Overall+/Shifting+)	Cluster 2 (Overall+/-)	Cluster 3 (Overall-)	Differences	<i>p</i>
N (Women/Men)	29 (13/16)	35 (13/22)	8 (5/3)		
Age	22.9 (3.7)	24.3 (4.3)	24.3 (2.8)		<i>ns</i>
Education	13.9 (2.6)	13.5 (2.6)	13.1 (2.5)		<i>ns</i>
Intellectual Measures					
Crystallized Int.	8.8 (2.1)	7.9 (1.8)	7.0 (1.7)	<sup>3</sup>	<.05
Fluid Int.	12.3 (2.7)	10.6 (2.3)	8.4 (2.4)	<sup>3</sup>	<.01
Health Variables					
BDI	5.8 (4.8)	5.3 (4.2)	6.3 (5.5)		<i>ns</i>
Neuropsychological Measures					
Brown-Peterson	34.4 (2.0)	34.2 (2.1)	32.4 (3.6)		<i>ns</i>
Reading Span	86.4 (8.3)	82.6 (10.2)	79.2 (6.5)	<sup>3</sup>	<.05
Alpha Span	74.0 (10.0)	74.1 (12.7)	61.6 (20.4)	<sup>3</sup>	<.05
Episodic Memory	14.4 (1.1)	14.1 (1.7)	12.4 (2.1)	<sup>3</sup>	<.05
Processing Speed	0.25 (0.78)	-0.06 (0.65)	-0.86 (0.74)	<sup>3</sup>	<.01

*Note.* Crystallized intelligence = Scaled Score on the WAIS-III Similarities Subtest; Fluid intelligence = Scaled score on the WAIS-III Digit-symbol coding subtest; BDI = Beck Depression Inventory; Brown-Peterson = Total Number of Letters Correctly Recalled; Reading Span = Total Number of Words Correctly Recalled; Alpha Span = Percentage of Correct Responses in the Alphabetical Recall Condition; Episodic Memory = Correct Responses on the Third Free Recall for the Free-Recall/Cued-Recall Procedure; Processing Speed = Composite Score Based on the Mean from the Choice Reaction Time Task and the Digit Comparison Task. <sup>3</sup> Significant difference between Clusters 1 and 3.

Figure 1

*Older Adults' Mean Attentional Control Composite Scores, by Cluster*

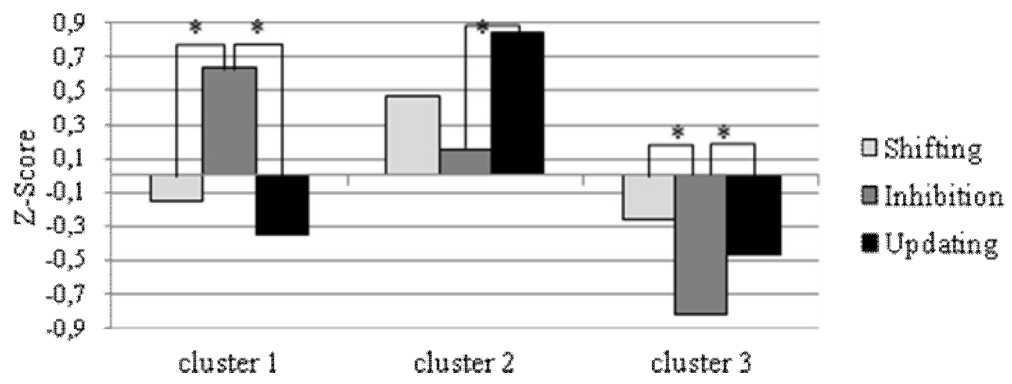
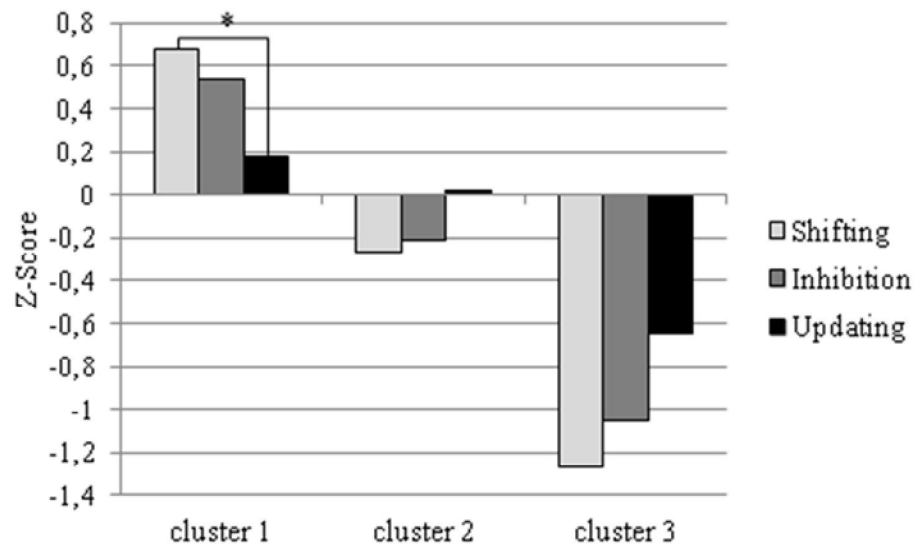


Figure 2

*Younger Adults' Mean Attentional Control Composite Scores, by Cluster*



## **CHAPITRE IV**

### **Discussion générale**

## **4.1 Rappel des objectifs et synthèse des résultats**

L'objectif général de cette thèse était de répondre à un ensemble de questions relatives au vieillissement normal de la MdeT et des fonctions de contrôle attentionnel (FCA) qui la sous-tendent. Nous nous sommes basés sur le modèle validé par Miyake et al. (2000) auprès de jeunes adultes, selon lequel l'alternance, l'inhibition et la mise à jour constituent trois FCA relativement indépendantes. Les travaux de cette thèse visaient à préciser l'effet de l'âge sur ces trois FCA, à évaluer leur contribution à la réalisation de tâches de MdeT, et à examiner si cette contribution était modifiée par le vieillissement. Ils visaient enfin à caractériser la variabilité interindividuelle présente chez les personnes âgées quant à ces trois FCA, ainsi que les facteurs qui y sont associés.

### **4.1.1 Synthèse des résultats de l'article 1**

Le but du premier article était de préciser l'effet du vieillissement normal sur la MdeT et sur chacune des FCA qui la sous-tendent. Il visait également à identifier les FCA qui contribuent à la réalisation de différentes tâches de MdeT, et si cette contribution diffère selon le groupe d'âge. Pour ce faire, trois tâches complexes de MdeT ont été administrées à un groupe de jeunes adultes et un groupe de personnes âgées. Des tâches mesurant l'alternance, l'inhibition et la mise à jour ont également été réalisées. L'administration de tâches de vitesse de traitement a permis de contrôler pour l'impact du ralentissement cognitif sur les effets observés. À la différence de plusieurs études rapportées dans la littérature, nous avons fait appel à une taille d'échantillon modérée ce qui offrait l'avantage d'une bonne puissance statistique. En outre, l'un des aspects novateurs de cette étude est d'avoir pu comparer la contribution des FCA et de la vitesse aux tâches complexes pour les jeunes adultes et pour les personnes âgées.

L'une de nos hypothèses était que l'âge n'aurait pas le même impact sur les trois FCA, et que l'inhibition serait particulièrement atteinte par le vieillissement, comparativement à la mise à jour et à l'alternance. Nous nous attendions également à ce que les FCA contribuent différemment aux trois tâches complexes de MdeT. De plus, il était attendu que des fonctions différentes prédiraient la performance de MdeT des jeunes adultes et des âgés, et que ces derniers utiliseraient davantage la mise à jour. Enfin, si différentes tâches de MdeT reposent

sur différentes FCA et si celles-ci ne sont pas toutes atteintes de la même façon par le vieillissement, nous nous attendions à ce que le vieillissement n'ait pas le même impact sur les trois tâches de MdeT.

Nos résultats ont appuyé plusieurs de nos hypothèses. Premièrement, l'étude confirme que le vieillissement normal a un impact différentiel sur les FCA. Bien que les tâches d'alternance, d'inhibition et de mise à jour soient toutes trois effectuées moins efficacement par les personnes âgées que par les jeunes adultes, la différence ne demeure significative que pour l'inhibition quand on contrôle pour l'impact du ralentissement cognitif. Deuxièmement, tel qu'attendu, l'impact du vieillissement sur la MdeT dépend de la tâche utilisée. Alors que la performance des âgés est inférieure à celle des jeunes pour les tâches d'empan de phrases et de Brown-Peterson, les deux groupes offrent une performance équivalente à la tâche d'empan alphabétique. Troisièmement, les résultats indiquent que la contribution des FCA varie selon la tâche de MdeT et selon le groupe d'âge. En effet, la tâche d'empan de phrases fait intervenir la vitesse de traitement autant pour les jeunes que pour les âgés, mais les âgés ont aussi recours à la mise à jour pour réaliser cette tâche. La performance à la tâche d'empan alphabétique est expliquée par la vitesse pour les jeunes alors qu'elle est surtout expliquée par l'inhibition pour les âgés. La tâche de Brown-Peterson fait quant à elle intervenir les mêmes processus chez les jeunes et chez les âgés, soient la mise à jour et la vitesse de traitement. Les implications théoriques et cliniques de ces résultats seront discutées dans les sections 4.2 et 4.3, respectivement.

#### **4.1.2 Synthèse des résultats de l'article 2**

Le deuxième article avait pour objectif de caractériser la variabilité interindividuelle dans les FCA proposées par Miyake et al. (2000), chez les personnes âgées et chez les jeunes adultes. Il visait également à déterminer si les profils de contrôle attentionnel des personnes âgées étaient caractérisés par plus de variabilité intra-individuelle que ceux des jeunes adultes. Par ailleurs, nous souhaitions examiner si différents profils de contrôle attentionnel se distinguent quant à certaines variables intellectuelles ou de santé, connues pour être associées aux différences individuelles sur le plan cognitif. Pour ce faire, des analyses hiérarchiques en grappes ont été réalisées afin de regrouper les participants en différents profils basés sur leurs



habiletés d'alternance, d'inhibition et de mise à jour. Ces analyses ont été réalisées séparément pour les jeunes et pour les âgés. Des mesures du fonctionnement intellectuel et de l'état de santé ont également été recueillies.

D'abord, à l'instar de ce qui a été montré avec les grands domaines de la cognition (Gunstad et al., 2006; Hilborn et al., 2009; Mitrushina et al., 1995; Valdois et al., 1990; Ylikoski et al., 1999), nous nous attendions à ce que différents profils de contrôle attentionnel soient identifiés au sein de nos deux groupes d'âge, et que les profils des âgés soient caractérisés par davantage de variabilité à travers les trois FCA que les profils des jeunes adultes. Nous envisagions que l'inhibition serait la FCA pour laquelle les différences seraient les plus marquées entre les sous-groupes de personnes âgées, étant donnée son importance en lien avec les différences individuelles au niveau cognitif et plus particulièrement au niveau exécutif. Enfin, nous avons émis l'hypothèse que le(s) sous-groupe(s) caractérisé(s) par des scores de contrôle attentionnel faibles présenterait(ent) davantage de facteurs de risques vasculaires et de symptômes dépressifs que les autres sous-groupes, et que ces individus soient moins performants sur le plan cognitif.

Les résultats mettent en évidence trois profils de contrôle attentionnel distincts au sein de l'échantillon de personnes âgées : un sous-groupe ayant une force relative en inhibition, un sous-groupe particulièrement fort en mise à jour, et un sous-groupe avec une faiblesse relative en inhibition. Tel qu'attendu, l'inhibition est la FCA critique pour distinguer entre les trois sous-groupes de personnes âgées. Trois profils de contrôle attentionnel ont également été identifiés chez les jeunes. On y observe un sous-groupe globalement fort, un sous-groupe dont les performances se situent globalement dans la moyenne comparativement au reste de l'échantillon, et un sous-groupe dont les performances sont globalement plus faibles. Tel qu'attendu, les profils des jeunes sont donc plutôt homogènes, en ce sens qu'on y note moins de variabilité à travers les trois FCA, comparativement aux profils des âgés. Enfin, les analyses indiquent que les personnes âgées présentant une faiblesse relative en inhibition sont plus atteintes que les individus appartenant aux deux autres profils, et ce, à plusieurs niveaux. Cette catégorie de personnes âgées présente en effet de plus bas niveaux de fonctionnement cognitif global et d'intelligence cristallisée, en plus de présenter davantage de symptômes

dépressifs et de facteurs de risque vasculaire. Leur performance à divers tests neuropsychologiques est également plus faible.

En somme, nos résultats permettent une meilleure compréhension du vieillissement de la MdeT et des FCA qui la sous-tendent. Ils ont d'importantes implications théoriques et cliniques, qui sont discutées dans les deux prochaines sections.

## **4.2 Implications théoriques de la thèse**

### **4.2.1 La séparabilité des fonctions de contrôle attentionnel**

D'abord, plusieurs aspects de nos résultats appuient l'idée selon laquelle le contrôle attentionnel opéré par l'administrateur central peut être fractionné en différents processus exécutifs de base qui seraient relativement indépendants (Burgess & Shallice, 1996; Engle & Kane, 2004; Levine et al., 1998; Miyake et al., 2000; Stuss, 2011; Stuss et al., 1995; West, 1996). D'abord, le fait que l'âge n'ait pas un effet équivalent sur chacune des trois FCA est un argument en faveur de leur séparabilité. En effet, si l'administrateur central constituait un système unitaire qui gère les ressources attentionnelles en effectuant différentes opérations cognitives, son atteinte avec l'âge se traduirait par des difficultés d'intensité équivalente pour l'ensemble des tâches cognitives qui en dépendraient. Or, l'effet délétère de l'âge est beaucoup plus important pour l'inhibition qu'il ne l'est pour l'alternance ou la mise à jour. Ce patron de résultats serait tout de même possible dans le cas d'un système de contrôle attentionnel unitaire, si les diverses tâches dépendent à des degrés différents de ce système. Par exemple, il serait possible que l'inhibition dépende plus de ce système que les deux autres FCA, ce qui pourrait expliquer son atteinte plus marquée. Par contre, cette hypothèse alternative ne pourrait rendre compte de deux aspects de nos résultats.

D'une part, la contribution différentielle des FCA à la réalisation des tâches de MdeT n'est possible que si les FCA sont séparables. D'autre part, les profils de contrôle attentionnel des âgés suggèrent que l'alternance, l'inhibition et la mise à jour peuvent varier de façon relativement indépendante au sein d'un même individu. À titre d'exemple, un sous-groupe présente une force en inhibition comparativement à l'ensemble de l'échantillon, alors que leurs habiletés d'alternance et de mise à jour sont dans la moyenne. Un système de contrôle

attentionnel unitaire se serait traduit, dans de telles analyses, par des profils beaucoup plus homogènes, par exemple des performances globalement fortes ou globalement faibles pour les trois fonctions, ce qui n'est pas le cas ici. En somme, comme Miyake et al. (2000) l'ont montré chez de jeunes adultes, nos résultats suggèrent que même si elles opèrent en interaction, l'alternance, l'inhibition et la mise à jour constituent trois FCA dissociables et que ce patron est aussi présent chez des personnes âgées. Comme elles sont séparables, la prochaine section discutera de l'effet du vieillissement normal sur chacune.

#### **4.2.2 Les fonctions de contrôle attentionnel**

*Mise à jour.* La mise à jour permet d'ajouter et de supprimer rapidement de l'information en MdeT selon l'évolution de la tâche en cours. Cette FCA paraît relativement résistante aux effets du vieillissement quand on contrôle pour le ralentissement cognitif. De plus, parmi les trois FCA à l'étude, la mise à jour est celle qui contribue le plus à la MdeT. Nos résultats montrent en effet que la mise à jour explique la performance des jeunes et des âgés au Brown-Peterson, ainsi que la performance des âgés à la tâche d'empan de phrases. Ces deux tâches requièrent que l'information traitée pendant la tâche interférente soit supprimée de la MdeT aussitôt l'opération interférente complétée (addition pour le Brown-Peterson et jugement de plausibilité pour la tâche d'empan de phrases). Ceci permet d'avoir accès rapidement à l'information maintenue en MdeT, avant que cette dernière ne soit à nouveau occupée par la tâche interférente.

La MdeT est un système dynamique de maintien dont la capacité et la durée sont limitées. Ceci entraîne la nécessité pour son contenu d'être continuellement « monitoré » et modifié (mis à jour). Baddeley conçoit d'ailleurs la mise à jour comme étant intimement liée au construit de la MdeT (Hofmann et al., 2012). Dans l'étude de Miyake et al. (2000), la performance à la tâche d'empan d'opérations est prédite par les capacités de mise à jour. Une autre étude a montré une corrélation pratiquement parfaite, entre la mise à jour et les tâches d'empan complexe (Schmiedek, Hildebrandt, Lovden, Lindenberger, & Wilhelm, 2009). Ceci suggère que les processus sous-jacents à ces deux types de tâches sont très similaires.

**Alternance.** L'alternance, soit la capacité à alterner le focus de son attention entre deux tâches ou deux opérations mentales (mental sets), n'est pas atteinte par l'âge lorsqu'on contrôle pour la vitesse de traitement. Ces résultats sont compatibles avec ceux d'Étienne et al. (2008), qui n'ont pas trouvé de différence entre les jeunes et les âgés à la tâche d'alternance de calculs, laquelle fait partie du score composite d'alternance utilisé dans la présente étude. D'autres études ont également montré une préservation des habiletés d'alternance dans le vieillissement (Lien et al., 2008; P. Verhaeghen & Basak, 2005; Wecker et al., 2000; West & Travers, 2008). L'absence d'effet d'âge sur l'alternance pourrait être en partie liée au type de mesures utilisées ici. Pour nos trois tâches mesurant ce construit, le coût d'alternance a été calculé utilisant les temps de réponse. Or, des auteurs ont suggéré qu'il y avait un compromis sur ces tâches entre la vitesse et l'exactitude, et que le coût d'alternance pouvait se manifester sur les erreurs davantage que sur les temps de réponse (Verhaeghen & Basak, 2005). Il est donc possible que des résultats différents eussent été observés si des mesures d'exactitude avaient été employées plutôt que des mesures de temps de réponse.

Nos résultats n'ont pas révélé une contribution de l'alternance aux tâches complexes de MdeT utilisées ici. Ceci est cohérent avec la proposition selon laquelle les paradigmes les plus utilisés pour mesurer l'alternance sont peu exigeants en terme d'attention exécutive (Kane et al., 2007), ce qui pourrait expliquer qu'ils partagent peu de variance avec les tâches de MdeT. La nature de nos mesures d'alternance peut également être en cause. Une étude a effectivement montré que l'empan de la MdeT est lié au coût de l'alternance en termes d'exactitude des réponses, mais pas en termes de temps (Unsworth & Engle, 2008).

**Inhibition.** Les résultats présentés dans les deux articles de cette thèse indiquent que l'inhibition se distingue particulièrement des deux autres FCA. Premièrement, l'examen des moyennes de groupe indique qu'il s'agit de la FCA sur laquelle l'effet du vieillissement normal est le plus important. C'est d'ailleurs la seule des trois fonctions pour laquelle l'effet d'âge demeure significatif après avoir contrôlé pour le ralentissement cognitif. Deuxièmement, les trois profils de contrôle attentionnel des âgés se distinguent quant aux capacités d'inhibition.

Par ailleurs, nos résultats indiquent que l'inhibition contribue peu à la réalisation des tâches complexes de MdeT, même chez le groupe de personnes âgées. Elle contribue à leur performance pour l'empan alphabétique, mais pas pour le Brown-Peterson ni pour l'empan de phrases. À première vue, ces résultats apparaissent peu compatibles avec la proposition théorique selon laquelle des variations interindividuelles au niveau des mécanismes d'inhibition sous-tendent les différences individuelles plus générales quant au contrôle exécutif et de la MdeT (Engle, 2002; Hasher et al., 2007; Kane et al., 2007). Il importe toutefois de garder en tête qu'il existe différents types d'inhibition (ex. : Friedman & Miyake, 2004; Hedden & Yoon, 2006; Lustig et al., 2007). Par exemple, Lustig, Hasher et Zacks (2007) distinguent le contrôle de l'accès au focus de l'attention (accès), la suppression de la MdeT des informations non pertinentes (suppression), et le fait d'inhiber la production d'une réponse dominante mais inappropriée dans un contexte donné (retenue). La tâche d'antisaccade et la tâche de Stroop utilisées dans cette thèse impliquent toutes deux la troisième de ces fonctions. Il est donc possible que ce soit les autres fonctions de l'inhibition qui ont un rôle dans les tâches complexes de MdeT. Notamment, la fonction de suppression pourrait contribuer de façon particulièrement importante aux tâches de MdeT. Par exemple, dans la tâche d'empan de phrases, il faut supprimer les phrases lues aussitôt qu'on a jugé de leur plausibilité, afin de libérer de l'espace dans la MdeT et ainsi permettre un maintien efficace du dernier mot de chaque phrase. Il importe de noter que cette fonction de suppression rejoint plusieurs aspects de la mise à jour telle qu'abordée dans cette thèse. Toutefois, le choix des tâches d'inhibition utilisées pour nos études était basé sur la définition que font Miyake et al. (2000) de cette fonction, afin que les FCA que nous mesurons soient comparables à celles qu'ils ont décrites.

#### **4.2.3 L'utilisation différentielle des fonctions de contrôle attentionnel selon l'âge**

Les résultats issus de cette thèse indiquent que les FCA qui contribuent à la MdeT diffèrent selon l'âge. Cette information doit être considérée dans les études comparant la performance de différents groupes d'âge à une même tâche, puisque les processus cognitifs comparés pourraient ne pas être les mêmes. Nos résultats indiquent que ceci est vrai, à tout le moins, pour l'empan de phrases et pour l'empan alphabétique. Pour ces deux tâches, la vitesse contribue à la performance de tous, mais les âgés utilisent en plus la mise à jour (pour l'empan

de phrases) et l'inhibition (pour l'empan alphabétique). Ces résultats montrent que pour une même tâche de MdeT administrée à un jeune adulte et à une personne âgée, les processus cognitifs en jeu ne sont pas exactement les mêmes. Ceci est compatible avec l'étude de Hull et al. (2008), qui suggère que les tâches exécutives classiques, comme la Tour de Hanoi et le Wisconsin Card Sorting Test, ne reposent pas sur les mêmes FCA chez une personne âgée que chez un jeune adulte. Nos résultats montrent qu'il en va de même pour des tâches de MdeT. Cependant, à la différence de l'étude de Hull et ses collaborateurs, notre étude incluait un groupe de jeunes adultes. Alors que ces auteurs ont interprété leurs résultats chez des âgés en les comparant à ceux obtenus chez des jeunes par Miyake et al. (2000), notre étude permet une comparaison directe des deux groupes d'âge. De plus, plusieurs tâches utilisées par Hull et al. avec des âgés étaient différentes de celles utilisées par Miyake et al. avec des jeunes. Ceci peut avoir contribué à l'obtention de résultats différents entre leurs deux études. Dans notre étude, les mêmes tâches ont été administrées aux jeunes et aux âgés, ce qui permet d'exclure cette possibilité.

La comparaison des résultats de la présente étude avec ceux de Miyake et al. (2000) et de Hull et al. (2008) suggère que les personnes âgées ont davantage recours à la mise à jour que les jeunes adultes pour effectuer diverses tâches cognitives complexes. Chez les jeunes adultes, la réalisation de tâches de MdeT et de tâches exécutives semble reposer sur des FCA différentes. En effet, Miyake et al. ont montré qu'ils utilisent l'inhibition et l'alternance pour des tâches exécutives, alors qu'ils utilisent la mise à jour pour une tâche de MdeT (l'empan d'opérations). Une contribution de la mise à jour à la MdeT des jeunes a également été mise en évidence dans la présente étude (pour le Brown-Peterson) et dans celle de Lehto (1996). De leur côté, les personnes âgées ont tendance à utiliser la mise à jour autant pour des tâches exécutives (Hull et al.) que des tâches de MdeT (tel que montré dans la présente étude). Ce plus grand recours à la mise à jour pour les âgés pourrait refléter une tentative de compensation. En effet, puisque leurs habiletés de mise à jour sont relativement préservées, il est envisageable qu'ils aient davantage recours à cette FCA pour pallier à leurs déclinés dans les autres processus impliqués dans la tâche (notamment la vitesse de traitement).

Plus généralement, le recours à des processus cognitifs différents des jeunes pour la réalisation d'une même tâche pourrait refléter une tentative de compensation de la part des personnes âgées. Il semble notamment que les âgés aient tendance à activer davantage les régions préfrontales que les jeunes quand ils réalisent une tâche de MdeT, ce qui est généralement interprété comme reflétant des processus compensatoires (Reuter-Lorenz & Sylvester, 2005). Nos résultats pourraient être compatibles avec l'hypothèse selon laquelle les âgés ont recours à des stratégies différentes ou alternatives pour tenter d'atteindre un niveau de performance comparable à celui des jeunes adultes (Belleville et al., 2011). Dans les tâches de MdeT, les âgés semblent avoir davantage recours aux FCA que les jeunes. Puisque leurs ressources sont plus limitées (ex. : Craik & Byrd, 1982), il est possible que les personnes âgées doivent les utiliser plus efficacement. Ils ont donc besoin, plus que les jeunes, de contrôler leurs ressources attentionnelles. Une telle gestion des ressources peut être moins nécessaire chez les jeunes adultes puisque celles-ci sont moins limitées. Pour eux, la vitesse de traitement est plus susceptible de limiter leurs performances, expliquant par le fait même une plus grande part de la variabilité dans leur MdeT. Il importe toutefois de mentionner que le plus grand recours des personnes âgées aux FCA lors de la réalisation d'une tâche de MdeT n'implique pas nécessairement de meilleures performances. Notamment parce que, tel qu'en fera état la prochaine section, la vitesse est atteinte dans le vieillissement et que la vitesse contribue beaucoup aux performances.

#### **4.2.4 Contribution de la vitesse de traitement**

Nos résultats mettent en évidence l'importante relation existant entre la vitesse de traitement et la MdeT. D'abord, le ralentissement cognitif explique une bonne partie des effets d'âge sur les FCA qui sous-tendent la MdeT. De plus, la vitesse est liée à la performance pour les trois tâches de MdeT, ce qui est compatible avec plusieurs travaux (ex. : Fry & Hale, 1996; Salthouse, 1996). Ceci est vrai pour les jeunes adultes et pour les personnes âgées. Cette association peut être expliquée par le modèle théorique proposé par Salthouse (1996). Celui-ci propose notamment que les tâches d'empan complexes (comme la tâche d'empan de phrases) sont particulièrement vulnérables aux effets du mécanisme de simultanéité. Ce mécanisme postule que la réalisation de tâches cognitives complexes implique une série d'étapes. Pendant qu'une étape est effectuée (par exemple, lire une phrase dans la tâche d'empan de phrases), les

sous-produits des étapes précédentes doivent être maintenus en MdeT. Un individu traitant l'information lentement pourrait ne pas être en mesure d'effectuer cette étape dans un délai assez rapide pour que les sous-produits des étapes précédentes soient encore disponibles en MdeT. Un tel phénomène pourrait par exemple expliquer la moindre performance des âgés à la tâche d'empan de phrases. Un scénario similaire pourrait être envisagé pour les deux autres tâches de MdeT à l'étude ici.

Les données présentées dans l'article 1 indiquent par ailleurs que la vitesse contribue davantage à la performance en MdeT des jeunes qu'à celle des âgés. En effet, parmi les fonctions à l'étude, la vitesse est le seul prédicteur significatif de la performance des jeunes adultes aux tâches d'empan de phrases et d'empan alphabétique. Pour ces mêmes tâches, la performance des personnes âgées est également expliquée par la mise à jour et l'inhibition, respectivement. Pour la tâche d'empan alphabétique, la vitesse influence la performance des jeunes dans une mesure beaucoup plus importante que pour les âgés. Il est envisageable que cette moindre contribution de la vitesse à la MdeT des âgés reflète une tentative de compensation de leur part. Puisque leur vitesse de traitement est clairement atteinte, il est effectivement possible qu'ils aient davantage recours à d'autres processus, comme les FCA, pour effectuer les tâches de MdeT. De plus, la seule tâche pour laquelle la vitesse ne contribue pas de façon majeure à la performance des personnes âgées (la tâche d'empan alphabétique) est la tâche pour laquelle les âgés performant aussi bien que les jeunes. Il apparaît d'ailleurs que l'impact du vieillissement sur la MdeT puisse dépendre des processus qui contribuent à la réalisation d'une tâche donnée. Cette question sera abordée dans la prochaine section.

#### **4.2.5 Mémoire de travail et vieillissement**

Nos résultats montrent que l'effet de l'âge sur la MdeT dépend de la tâche utilisée. Les âgés sont atteints à la tâche d'empan de phrases et au Brown-Peterson, alors qu'ils performant aussi bien que les jeunes à la tâche d'empan alphabétique. L'effet d'âge à la tâche d'empan de phrases est cohérent avec la littérature (ex. : McCabe & Hartman, 2003; Meguro et al., 2000). L'absence de différence entre les jeunes et les âgés à la tâche d'empan alphabétique est quant à elle compatible avec une étude précédente ayant rapporté une préservation avec l'âge des habiletés de manipulation de l'information en MdeT (Belleville et al., 1998). Pour ce qui est



de l'atteinte des personnes âgées au Brown-Peterson, nos résultats rejoignent ceux de certains auteurs (Floden et al., 2000; Inman & Parkinson, 1983; mais voir Belleville et al., 1996; Bherer et al., 2001). Globalement, ces résultats indiquent qu'à l'intérieur d'un même échantillon de participants, certaines tâches de MdeT sont sensibles à l'âge alors que d'autres ne le sont pas. Les inconsistances relevées dans la littérature concernant l'impact du vieillissement sur la MdeT ne résultent donc pas simplement de différences dans les caractéristiques individuelles des participants à travers les études, mais reflètent sans doute des différences dans les processus sollicités par ces tâches. De plus, la taille de l'échantillon utilisé dans notre étude permet d'exclure la possibilité que l'absence d'effet d'âge sur l'empan alphabétique soit due à une faible puissance statistique, une possibilité qui ne pouvait être complètement exclue dans les études précédentes (ex. : Belleville et al., 1998).

Un de nos objectifs était d'examiner si les atteintes différentielles de la MdeT dans le vieillissement pourraient résulter du fait que les trois tâches de MdeT font intervenir des FCA différentes, sur lesquelles l'âge n'a pas le même impact. Bien que les trois tâches de MdeT ne fassent pas intervenir les mêmes FCA, cela ne semble pas expliquer les effets d'âge sur ces tâches. Par exemple, les âgés sont atteints à la tâche d'empan de phrases, qui fait intervenir la mise à jour, laquelle ne semble pourtant pas décliner avec l'âge. En revanche, les âgés performant aussi bien que les jeunes à la tâche d'empan alphabétique, qui fait intervenir l'inhibition, laquelle décline de façon importante dans le vieillissement. Ainsi, la seule tâche de MdeT impliquant une FCA atteinte est celle pour laquelle les âgés performant aussi bien que les jeunes, ce qui peut paraître contre-intuitif. Cependant, des différences dans les autres processus impliqués dans les tâches de MdeT pourraient expliquer ce résultat. Par exemple, il est possible que les tâches impliquant la mise à jour fassent aussi intervenir des processus autres que les FCA, qui sont potentiellement encore plus atteints dans le vieillissement (par exemple la vitesse de traitement). De plus, concernant la contribution de l'inhibition à tâche d'empan alphabétique, il est envisageable que les exigences spécifiques à cette tâche empêchent les personnes âgées d'avoir recours à la mise à jour comme stratégie compensatoire. Cela pourrait expliquer pourquoi ils ont recours à l'inhibition. Le fait que leur performance à la tâche ne soit pas atteinte, en dépit de leur atteinte de l'inhibition, pourrait être dû au petit pourcentage de variance expliquée par notre modèle. En effet, les autres processus

cognitifs impliqués dans cette tâche et non mesurés dans notre étude pourraient rendre compte de l'absence de déclin avec l'âge de la performance à cette tâche. Qui plus est, les résultats de l'article 2 ayant montré une importante variabilité interindividuelle dans les habiletés d'inhibition des personnes âgées, il est également probable que ce soit le sous-groupe ayant une force relative en inhibition qui a eu recours à cette FCA pour effectuer la tâche d'empan alphabétique.

#### **4.2.6 La variabilité interindividuelle**

L'étude de la variabilité interindividuelle quant à l'efficacité du contrôle attentionnel permet une meilleure compréhension du vieillissement normal. Elle permet entre autres d'identifier les facteurs qui font que l'âge a peu d'impact sur les fonctions cognitives de certains individus alors que d'autres sont davantage affectés. L'article 2 met en évidence différents profils de contrôle attentionnel chez les personnes âgées et chez les jeunes adultes. Chez les jeunes adultes, les différences entre les profils obtenus sont plutôt quantitatives. En effet, les trois FCA sont relativement homogènes à l'intérieur de chaque profil : les jeunes ont tendance à être soit globalement performants, soit dans la moyenne, soit plus faibles, et ce pour les trois FCA. En revanche, chez les personnes âgées, les différences entre les profils obtenus sont plutôt qualitatives. Les profils se distinguent effectivement quant à leur patron de forces et faiblesses relatives, plutôt que quant à leur niveau global de performance. Ceci suggère que le vieillissement n'a pas un impact équivalent sur les trois FCA pour un individu donné. Ceci indique également qu'il existe une importante variabilité interindividuelle quant aux FCA qui sont affectées par le vieillissement. Un lien intéressant peut être établi entre les résultats de l'article 1 et les profils de contrôle attentionnel des âgés mis en évidence dans l'article 2. Le sous-groupe de personnes âgées présentant une force relative en mise à jour semble être un sous-groupe qui est en mesure de compenser, à plusieurs niveaux. En effet, comparativement au sous-groupe présentant une faiblesse relative en inhibition, ces individus ont un meilleur fonctionnement cognitif global et une plus haute intelligence cristallisée, en plus de performer mieux aux épreuves de mémoire épisodique, de mémoire de travail et de vitesse.

Ceci dit, la source des variabilités inter- et intra-individuelle mises en évidence dans la présente thèse demeure à explorer. La génétique pourrait expliquer une partie des différences individuelles quant aux fonctions exécutives (Barnes, Dean, Nandam, O'Connell, & Bellgrove, 2011). Les FCA à l'étude dans cette thèse seraient d'ailleurs influencées par la génétique (Friedman et al., 2008). Au-delà de l'hérédité, des facteurs environnementaux influencent aussi les fonctions exécutives. Par exemple, les effets de pratique sont susceptibles de rendre compte d'une partie importante de la variance dans le contrôle exécutif (Braver, Cole, & Yarkoni, 2010). Par contre, nos données montrent que l'éducation n'est pas associée à la variabilité interindividuelle au niveau des FCA. Ceci est compatible avec les résultats selon lesquels l'éducation aurait un effet protecteur sur les habiletés cristallisées, telles que les connaissances sémantiques, mais pas sur les habiletés fluides, comme le raisonnement (Anstey & Christensen, 2000; Christensen, 2001). Quoi qu'il en soit, les différences individuelles quant aux FCA résultent fort probablement de l'interaction entre des caractéristiques propres à l'individu et des influences environnementales.

La présence d'un sous-groupe de personnes âgées avec un contrôle attentionnel plus faible porte à croire que certains individus sont plus sensibles aux effets délétères du vieillissement. Ceci pourrait être dû à la présence d'importantes différences individuelles dans les régions cérébrales altérées par le vieillissement et dans la vitesse à laquelle ces altérations progressent (Luszcz, 2011). Notamment, les lobes frontaux ne seraient pas affectés chez tous les individus vieillissants. Les trajectoires qu'empruntent ces modifications cérébrales varieraient à la fois selon la région du cerveau et selon les individus (Raz, Ghisletta, Rodrigue, Kennedy, & Lindenberger, 2010). À ce sujet, des facteurs tels que l'histoire prénatale, périnatale et postnatale précoce, le stress, de l'inflammation récurrente, et des événements vasculaires cérébraux sous-cliniques ont été identifiés comme ayant potentiellement un impact sur le vieillissement cérébral (Raz & Rodrigue, 2006). Ces éléments, en plus de ceux mentionnés précédemment, sont donc susceptibles de rendre compte de la présence de différents profils de contrôle attentionnel parmi les personnes âgées. L'effet différentiel du vieillissement sur les diverses régions du cerveau peut par ailleurs expliquer qu'un individu donné présente des atteintes de certaines facettes du contrôle attentionnel alors que d'autres sont préservées.

Il importe également de souligner la contribution potentielle du style de vie à la variabilité observée entre les individus âgés. Notamment, la pratique d'activité physique (Hillman, Erickson, & Kramer, 2008; Kramer, Erickson, & Colcombe, 2006), une alimentation bien équilibrée au plan nutritionnel (La Rue et al., 1997; Morris, 2012) et l'engagement dans des activités cognitives (Dellenbach & Zimprich, 2008; Parisi, Stine-Morrow, Noh, & Morrow, 2009; Pushkar Gold et al., 1995) auraient un effet bénéfique sur le fonctionnement cognitif des personnes âgées. Les relations sociales et le support émotionnel qu'elles procurent seraient également associés à un meilleur fonctionnement cognitif dans le vieillissement (Seeman, Lusignolo, Albert, & Berkman, 2001). De façon plus spécifique, l'intelligence fluide a également été associée à des facteurs tels que l'expertise musicale (Bialystok & DePape, 2009), le bilinguisme (Colzato et al., 2008), le type d'emploi (Schooler et al., 1999), ou le fait de rechercher des activités qui soient cognitivement stimulantes (Baer et al., 2012). Bien que ces variables n'aient pas été examinées dans le cadre de la présente thèse, il est probable qu'elles puissent rendre compte d'une partie de la variabilité observée entre les individus.

#### **4.2.7 Hypothèses alternatives**

Bien qu'ils appuient l'hypothèse de la diversité du contrôle attentionnel, il est important d'examiner nos résultats à la lumière d'autres modèles d'organisation des FCA. D'une part, de plus en plus de données portent à croire que les différences individuelles au niveau de l'inhibition seraient expliquées par des processus qui sont communs avec la mise à jour et l'alternance (ex. : Friedman et al., 2008). Depuis la version originale de leur modèle théorique en 2000, Miyake et ses collaborateurs ont poursuivi leurs recherches, les conduisant à proposer une nouvelle version de leur modèle, qu'ils appellent le « unity/diversity framework » (Miyake & Friedman, 2012). Selon ce nouveau cadre conceptuel, un facteur exécutif commun rendrait compte d'une partie significative de la variance aux tâches mesurant chacune des trois FCA, mais rendrait compte de la totalité de la variance à leurs tâches d'inhibition. Ce facteur commun permettrait le maintien actif des buts de la tâche et de l'information relative à ces buts, et l'utilisation de cette information pour guider les

traitements de plus bas niveau vers ce qui est pertinent pour la tâche en cours (Friedman, Miyake, Robinson, & Hewitt, 2011). La définition que font les auteurs de ce facteur commun en fait un concept très proche du concept d'attention exécutive élaboré par Engle et ses collaborateurs, qui établissent d'ailleurs d'importants chevauchements entre l'attention exécutive et l'inhibition (Engle, 2002; Kane et al., 2007). Toujours dans le nouveau cadre théorique développé par Miyake et Friedman, une partie de la variance pour l'alternance et la mise à jour est expliquée par des processus spécifiques à chacune. Pour situer nos données par rapport à ce nouveau cadre théorique, il semble donc que le vieillissement normal ait un effet délétère sur le facteur exécutif commun, alors que les processus plus spécifiques à l'alternance et à la mise à jour seraient préservés.

D'autre part, au cours des dernières années, des études factorielles en vieillissement se sont penchées sur les trois fonctions proposées par Miyake et al. (2000). Deux de ces études concluent que le contrôle attentionnel des personnes âgées comprend deux facteurs, soient l'inhibition d'une part, et un facteur regroupant l'alternance et la mise à jour d'autre part (Adrover-Roig et al., 2012; Hedden & Yoon, 2006). Un tel chevauchement entre les construits d'alternance et de mise à jour pourrait être cohérent avec l'absence de contribution de l'alternance à nos tâches de MdeT. Les FCA étant modérément corrélées, la variance commune entre l'alternance et la mise à jour pourrait expliquer pourquoi les régressions multiples n'identifient pas l'alternance comme étant un prédicteur significatif : une fois la variance à la tâche de MdeT expliquée par la mise à jour ayant été enlevée, il est possible que la variance expliquée par l'alternance soit insuffisante pour en faire un prédicteur significatif. Rappelons toutefois que ces deux FCA n'étaient que modérément corrélées dans notre étude, ce qui suggère qu'elles sont relativement indépendantes.

Par ailleurs, il importe de souligner la possibilité que les résultats de la première étude aient été influencés par la nature des mesures utilisées. Plus précisément, l'importante contribution de la mise à jour aux tâches de MdeT pourrait être liée, du moins en partie, au fait que les variables d'intérêt pour ces deux types de tâches étaient des mesures d'exactitude, alors que des mesures de temps de réponse étaient utilisées pour les tâches d'alternance et

pour l'une des deux tâches d'inhibition. Il est donc envisageable que la moindre contribution de ces deux FCA aux tâches de MdeT puisse être expliquée, en partie du moins, par ce facteur.

### **4.3 Implications cliniques générales de la thèse**

Les données issues de cette thèse quant à la diversité des FCA ont des implications pour la compréhension du vieillissement cognitif normal, notamment pour les neuropsychologues travaillant auprès des personnes âgées. Sans remettre en question la pertinence d'évaluer la MdeT avec des tâches complexes comme le Brown-Peterson, nos résultats indiquent qu'il est aussi important d'évaluer les processus cognitifs plus fins qui sous-tendent la performance à ces tâches. Ceci permettrait, le cas échéant, d'isoler des déficits plus subtils au niveau de certaines FCA, permettant ainsi de mettre en place des interventions et aménagements plus adaptés aux besoins spécifiques de l'individu. Le fait que les FCA soient séparables indique que des patrons d'atteintes différentielles pourraient être présents dans les pathologies du cerveau. La possibilité d'identifier et de mesurer des atteintes plus spécifiques pourrait éventuellement ouvrir la voie à un diagnostic plus précoce ainsi qu'à l'établissement plus précis du pronostic de la personne, permettant de lui offrir des interventions plus adaptées à sa condition.

Les résultats présentés ici indiquent par ailleurs que la sélection d'un test pour évaluer la MdeT ne doit pas être faite sur une base arbitraire, puisque les processus cognitifs plus fins sous-tendant la réalisation de différents tests varient selon le test choisi. Dans notre étude, les personnes âgées présentent des atteintes aux tâches de Brown-Peterson et d'empan de phrases, alors que leur performance à la tâche d'empan alphabétique n'est pas atteinte. Or, ces différents tests sont parfois utilisés de façon interchangeable, en clinique, pour évaluer la MdeT. Ainsi, un neuropsychologue pourrait conclure à une atteinte de la MdeT chez son patient sur la base d'un test, alors qu'il aurait pu conclure à une préservation de la MdeT chez ce même patient si un test différent avait été utilisé. À la lumière de nos résultats, il apparaît donc crucial d'évaluer la MdeT à l'aide de quelques tests différents, afin de s'assurer d'obtenir une mesure valide de l'intégrité de la MdeT, qui prend en considération les différents processus qui peuvent sous-tendre ce système cognitif complexe.

Nos résultats indiquent également que les personnes âgées en tant que groupe sont particulièrement atteintes au niveau de l'inhibition, comparativement à de jeunes adultes. Bien que les résultats présentés dans l'article 2 mettent en garde contre une telle généralisation (puisque certains sous-groupes parmi les personnes âgées présentent de bonnes capacités d'inhibition), il s'agit d'une FCA particulièrement sensible aux effets délétères du vieillissement. Ces résultats soulèvent la possibilité que l'inhibition puisse être plus sensible que l'alternance ou la mise à jour aux modifications s'opérant dans le cerveau vieillissant. Un tel phénomène pourrait d'ailleurs expliquer pourquoi des déficits subtils d'inhibition figureraient parmi les marqueurs cognitifs les plus précoces de la phase préclinique de maladies neurodégénératives (Belanger & Belleville, 2009; Belanger, Belleville, & Gauthier, 2010; Belleville, Rouleau, & Van der Linden, 2006; Collette, Schmidt, Scherrer, Adam, & Salmon, 2009). Nos résultats soulèvent la possibilité que parmi la population âgée normale, un sous-groupe d'individus dont les mécanismes inhibiteurs sont plus faibles puisse être plus à risque de progresser vers une démence. Quoi qu'il en soit, l'importante atteinte de l'inhibition chez les personnes âgées peut avoir des répercussions sur leur efficacité dans des situations de la vie quotidienne qui requièrent de l'inhibition. Par exemple, il peut être particulièrement exigeant pour une personne âgée de se concentrer sur le discours d'une personne sans se laisser distraire par les conversations des autres personnes autour d'eux. Les situations où un but doit être maintenu en tête afin que la personne ne cède pas à ses automatismes peuvent également être plus exigeantes pour une personne âgée.

Dans un autre ordre d'idées, nos résultats mettent en évidence l'importance de ne pas considérer les personnes âgées comme un groupe homogène. Nous avons en effet montré que différents profils de contrôle attentionnel existent au sein d'un groupe de personnes âgées considérées comme normales. Certaines caractéristiques personnelles paraissent associées à l'efficacité du contrôle attentionnel. Parmi celles-ci figure la présence d'affects dépressifs et de facteurs de risques vasculaires. Ces résultats sont compatibles avec la littérature selon laquelle les facteurs de risques vasculaires sont associés à une moindre efficacité du contrôle attentionnel et des fonctions exécutives (Kuo et al., 2004; Novak & Hajjar, 2010; Singh-Manoux & Marmot, 2005; Vicario, Martinez, Baretto, Diaz Casale, & Nicolosi, 2005; Villeneuve et al., 2009). Il en va de même pour la dépression (Austin et al., 2001). La

littérature fait d'ailleurs état d'une importante comorbidité entre la dépression et les maladies vasculaires (ex. : Niranjan, Corujo, Ziegelstein, & Nwulia, 2012).

Plus globalement, les résultats issus de cette thèse contribuent à l'avancement des connaissances dans le domaine du vieillissement cognitif et ont des répercussions potentielles pour la société. Il a été proposé qu'aussi longtemps que les fonctions exécutives ne sont pas atteintes, une personne peut être autonome et productive, et ce en dépit du déclin d'autres fonctions cognitives (Lezak, Howieson, & Loring, 2004). La réalisation de plusieurs activités cognitives complexes dépend effectivement d'un contrôle efficace de l'attention (Strauss et al., 2006). Il en va de même pour l'accomplissement de plusieurs activités instrumentales de la vie quotidienne, telles que la gestion financière ou la prise de médicaments (Bell-McGinty et al., 2002; Jefferson et al., 2006; Vaughan & Giovanello, 2010). Une meilleure compréhension de l'évolution avec l'âge des processus à la base du contrôle attentionnel est donc cruciale dans le contexte actuel du vieillissement de la population. Des coûts sociaux et économiques majeurs sont associés à la perte d'autonomie fonctionnelle des personnes âgées. Le développement d'interventions et d'aménagements permettant de préserver l'autonomie le plus longtemps possible repose d'abord sur une caractérisation précise des fonctions cognitives qui sont atteintes ou préservées dans le vieillissement.

#### **4.4 Limites de la thèse**

Certaines limites doivent évidemment être prises en considération dans l'interprétation des résultats présentés dans cette thèse. Une première limite réside dans la sélection des participants. Puisqu'ils ont été volontaires pour se soumettre à cette étude, qui impliquait de se déplacer pour participer à deux ou trois rencontres de près de deux heures, il est hautement probable que ces gens présentent des caractéristiques différentes de ceux qui ne se sont pas portés volontaires. Ainsi, la généralisation pouvant être faite de nos résultats à l'ensemble de la population s'en trouve réduite (Meltzoff, 1998). Une telle limite est cependant inhérente aux études de ce type. Une autre variable potentiellement confondante est la moins grande familiarité des personnes âgées avec le matériel informatique.



Par ailleurs, dans l'article 1, nous avons utilisé des régressions multiples basées sur des scores composites plutôt que les analyses par équations structurales. Notre choix était justifié par des considérations méthodologiques. La taille des groupes constituant notre étude était insuffisante pour avoir recours à cette approche statistique, étant donnée la quantité de variables à l'étude. Il est effectivement recommandé d'avoir au moins 20 participants pour chaque paramètre à estimer dans un modèle (Kline, 2011). Afin d'utiliser cette approche statistique dans la présente étude, il aurait ainsi fallu un minimum de 280 participants.

#### **4.5 Perspectives futures**

Il serait intéressant de suivre les participants ayant pris part à l'étude avec un devis longitudinal. Un tel suivi permettrait, entre autres, de déterminer si l'appartenance à l'un ou l'autre des profils de contrôle attentionnel au temps 1 est associée à des déclin plus ou moins prononcés dans les années qui suivent, ou encore à une progression vers le trouble cognitif léger ou une maladie neurodégénérative. Il s'agit d'ailleurs d'un projet actuellement en cours dans notre laboratoire. De plus, il serait très pertinent d'explorer si l'interaction entre l'appartenance à un profil de contrôle attentionnel et la présence de certains facteurs (affects dépressifs, facteurs de risques vasculaires, de même que des caractéristiques cérébrales) a une valeur prédictive encore plus importante quant à un éventuel déclin cognitif et/ou fonctionnel. En effet, comme le proposent Singh-Manoux et collaborateurs (2012), l'étude des trajectoires de déclin cognitif chez les personnes âgées saines pourrait permettre l'identification précoce de facteurs de risques pour d'éventuels déclin cognitifs. L'analyse de ces données serait donc d'une importance capitale pour le diagnostic de plus en plus précoce de diverses conditions neurodégénératives, d'autant plus que l'on considère maintenant les démences comme résultant d'un processus s'échelonnant sur au moins 20 à 30 ans (Launer, 2005; Alzheimer's Disease International, 2009).

Il serait par ailleurs pertinent d'explorer le lien entre l'intégrité des FCA et des mesures neuroanatomiques. Par exemple, la performance à des tâches exécutives complexes serait associée à un plus grand volume du cortex préfrontal (Gunning-Dixon & Raz, 2003; Raz et al., 1998) et à une plus petite quantité d'hyperintensités de la matière blanche au niveau frontal

(Gunning-Dixon & Raz, 2003). Il serait donc très intéressant d'examiner dans quelle mesure ces mesures expliquent la variabilité dans l'efficacité du contrôle attentionnel.

L'essor de la recherche au niveau génétique ouvre la voie à l'investigation de facteurs génétiques contribuant à l'efficacité du contrôle attentionnel. Tel que mentionné précédemment, Friedman et collaborateurs (Friedman et al., 2008) ont montré des liens clairs entre la génétique et l'intégrité des trois FCA. Toujours dans une optique d'identification précoce de potentiels déclinis cognitifs associés au vieillissement, il serait pertinent d'examiner si l'appartenance à l'un ou l'autre des profils de contrôle attentionnel est associée à la présence d'un génotype donné. Entre autres, la MdeT serait associée à l'allèle E4 du gène de l'apolipoprotéine E (Bender & Raz, 2012) ainsi que deux variantes du gène catechol-0-methyl transférase (Ilkowska & Engle, 2010). Il conviendrait donc d'examiner les liens entre ces polymorphismes et les FCA qui sous-tendent la MdeT.

Enfin, de plus en plus de recherches sont dédiées à développer des entraînements pour les fonctions cognitives, notamment pour les fonctions exécutives. À titre d'exemple, il est possible d'entraîner la mise à jour et que cela se transfère à une tâche similaire (Dahlin, Neely, Larsson, Backman, & Nyberg, 2008). Bien que leur portée soit limitée étant donnée la nature assez spécifique des effets observés, ces résultats suggèrent qu'il peut être possible d'améliorer l'efficacité du contrôle attentionnel. Dans le même ordre d'idées, les capacités d'attention divisée peuvent être améliorées chez des individus ayant des déficits exécutifs (Gagnon & Belleville, 2012). Comme il a récemment été proposé que l'attention divisée puisse constituer une FCA au même titre que l'alternance, l'inhibition ou la mise à jour (Miyake & Friedman, 2012), ces résultats portent à croire que ces FCA sont elles aussi susceptibles d'être entraînées. Ainsi, les recherches futures devraient être axées sur le développement d'interventions visant ce qui est atteint, particulièrement l'inhibition. Tel que mentionné précédemment, une personne dont les fonctions exécutives sont efficaces peut garder son autonomie très longtemps, et ce en dépit de multiples atteintes cognitives autres (Lezak et al., 2004). La recherche visant l'amélioration et la préservation des fonctions exécutives est donc cruciale dans le contexte actuel de vieillissement de la population. Le fait

de retarder le besoin de prise en charge des personnes âgées en préservant leur autonomie plus longtemps aura des répercussions très favorables sur la société.

## Références pour introduction et discussion générale

- Adrover-Roig, D., Sese, A., Barcelo, F., & Palmer, A. (2012). A latent variable approach to executive control in healthy ageing. *Brain and Cognition*, 78(3), 284-299.
- Albert, M. S., Moss, M. B., Tanzi, R., & Jones, K. (2001). Preclinical prediction of AD using neuropsychological tests. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 7(5), 631-639.
- Aldenderfer, M. S., & Blashfield, R. K. (1984). *Cluster Analysis*. Beverly Hills, CA: Sage Publications.
- Alzheimer's Disease International. (2009). *World Alzheimer Report*. London : Alzheimer's Disease International.
- Andres, P., & Van der Linden, M. (2000). Age-related differences in supervisory attentional system functions. *Journal of Gerontology B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 55(6), P373-380.
- Anstey, K., & Christensen, H. (2000). Education, activity, health, blood pressure and apolipoprotein E as predictors of cognitive change in old age: A review. *Gerontology*, 46(3), 163-177.
- Austin, M. P., Mitchell, P., & Goodwin, G. M. (2001). Cognitive deficits in depression: possible implications for functional neuropathology. *British Journal of Psychiatry*, 178, 200-206.
- Backman, L., Jones, S., Berger, A. K., Laukka, E. J., & Small, B. J. (2005). Cognitive impairment in preclinical Alzheimer's disease: a meta-analysis. *Neuropsychology*, 19(4), 520-531.
- Baddeley, A. (1986). *Working memory*. New York: Clarendon Press / Oxford University Press.
- Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255(5044), 556-559.
- Baddeley, A. (1996a). Exploring the central executive: *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology*, 49A(1), 5-28.

- Baddeley, A. (1996b). The fractionation of working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 93(24), 13468-13472.
- Baddeley, A. (1998). The central executive: a concept and some misconceptions. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 4(5), 523-526.
- Baddeley, A. (2002a). Fractionating the central executive. In D. T. Stuss & T. Robert (Eds.), *Principles of frontal lobe function* (pp. 246-260). New York, NY: Oxford University Press.
- Baddeley, A. (2002b). Is working memory still working? *European Psychologist*, 7(2), 85-97.
- Baddeley, A. (2003). Working memory: looking back and looking forward. *Nature Reviews: Neurosciences*, 4(10), 829-839.
- Baddeley, A. (2012). Working memory: theories, models, and controversies. *Annual Review of Psychology*, 63, 1-29.
- Baddeley, A., Chincotta, D., & Adlam, A. (2001). Working memory and the control of action: evidence from task switching. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130(4), 641-657.
- Baddeley, A., & Hitch, G. J. (1974). *Working memory: The Psychology of Learning and Motivation* (Vol. VIII, pp. 47-90). New York: Academic Press.
- Baddeley, A., & Logie, R. H. (1999). Working memory: The multiple-component model. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 28-61). New York: Cambridge University Press.
- Baer, L. H., Tabri, N., Blair, M., Bye, D., Li, K. Z., & Pushkar, D. (2012). Longitudinal Associations of Need for Cognition, Cognitive Activity, and Depressive Symptomatology With Cognitive Function in Recent Retirees. *Journal of Gerontology Series B: Psychological Science and Social Science*, Epub ahead of print.
- Barnes, J. J., Dean, A. J., Nandam, L. S., O'Connell, R. G., & Bellgrove, M. A. (2011). The molecular genetics of executive function: role of monoamine system genes. *Biological Psychiatry*, 69(12), 127-143.
- Belanger, S., & Belleville, S. (2009). Semantic inhibition impairment in mild cognitive impairment: a distinctive feature of upcoming cognitive decline? *Neuropsychology*, 23(5), 592-606.

- Belanger, S., Belleville, S., & Gauthier, S. (2010). Inhibition impairments in Alzheimer's disease, mild cognitive impairment and healthy aging: effect of congruency proportion in a Stroop task. *Neuropsychologia*, *48*(2), 581-590.
- Bell-McGinty, S., Podell, K., Franzen, M., Baird, A. D., & Williams, M. J. (2002). Standard measures of executive function in predicting instrumental activities of daily living in older adults. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, *17*(9), 828-834.
- Belleville, S., Chertkow, H., & Gauthier, S. (2007). Working memory and control of attention in persons with Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *Neuropsychology*, *21*(4), 458-469.
- Belleville, S., Clement, F., Mellah, S., Gilbert, B., Fontaine, F., & Gauthier, S. (2011). Training-related brain plasticity in subjects at risk of developing Alzheimer's disease. *Brain*, *134*(6), 1623-1634.
- Belleville, S., Peretz, I., & Malenfant, D. (1996). Examination of the working memory components in normal aging and in dementia of the Alzheimer type. *Neuropsychologia*, *34*(3), 195-207.
- Belleville, S., Rouleau, N., & Caza, N. (1998). Effect of normal aging on the manipulation of information in working memory. *Memory and Cognition*, *26*(3), 572-583.
- Belleville, S., Rouleau, N., & Van der Linden, M. (2006). Use of the Hayling task to measure inhibition of prepotent responses in normal aging and Alzheimer's disease. *Brain and Cognition*, *62*(2), 113-119.
- Bender, A. R., & Raz, N. (2012). Age-related differences in memory and executive functions in healthy APOE varepsilon4 carriers: the contribution of individual differences in prefrontal volumes and systolic blood pressure. *Neuropsychologia*, *50*(5), 704-714.
- Bherer, L., Belleville, S., & Peretz, I. (2001). Education, age, and the Brown-Peterson technique. *Developmental Neuropsychology*, *19*(3), 237-251.
- Bialystok, E., & De Pape, A. M. (2009). Musical expertise, bilingualism and executive functioning Journal of experimental psychology: *Human Perception and Performance*, *35*, 565-574.
- Blackler, D., Lee, H., Muzikansky, A., Martin, E. C., Tanzi, R., McArdle, J. J., . . . Albert, M. (2007). Neuropsychological measures in normal individuals that predict subsequent cognitive decline. *Archives of Neurology*, *64*(6), 862-871.

- Braver, T. S., Cole, M. W., & Yarkoni, T. (2010). Vive les différences! Individual variation in neural mechanisms of executive control. *Current Opinions in Neurobiology*, 20(2), 242-250.
- 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*, 3rd edition. New York: Psychology Press.
- Brown, J. (1958). Some tests of the decay theory of immediate memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 10, 12-21.
- Burgess, P. W., & Shallice, T. (1996). Response suppression, initiation and strategy use following frontal lobe lesions. *Neuropsychologia*, 34(4), 263-272.
- Burzynska, A. Z., Nagel, I. E., Preuschhof, C., Li, S. C., Lindenberger, U., Backman, L., & Heekeren, H. R. (2011). Microstructure of frontoparietal connections predicts cortical responsivity and working memory performance. *Cerebral Cortex*, 21(10), 261-271.
- Butler, K. M., Zacks, R. T., & Henderson, J. M. (1999). Suppression of reflexive saccades in younger and older adults: age comparisons on an antisaccade task. *Memory and Cognition*, 27(4), 584-591.
- Charlton, R. A., Barrick, T. R., Lawes, I. N., Markus, H. S., & Morris, R. G. (2010). White matter pathways associated with working memory in normal aging. *Cortex*, 46(4), 474-489.
- Chen, P., Ratcliff, G., Belle, S. H., Cauley, J. A., DeKosky, S. T., & Ganguli, M. (2001). Patterns of cognitive decline in presymptomatic Alzheimer disease: a prospective community study. *Archives of General Psychiatry*, 58(9), 853-858.
- Christensen, H. (2001). What cognitive changes can be expected with normal ageing? *Australian and New Zealand Journal of Psychiatry*, 35(6), 768-775.
- Christensen, H., Mackinnon, A., Jorm, A. F., Henderson, A. S., Scott, L. R., & Korten, A. E. (1994). Age differences and interindividual variation in cognition in community-dwelling elderly. *Psychology and Aging*, 9(3), 381-390.
- Christensen, H., Mackinnon, A. J., Korten, A. E., Jorm, A. F., Henderson, A. S., & Jacomb, P. (1999). Dispersion in cognitive ability as a function of age: A longitudinal study of an elderly community sample. *Aging, Neuropsychology and Cognition*, 6(3), 214-228.

- Coffey, C. E., Wilkinson, W. E., Parashos, I. A., Soady, S. A. R., Sullivan, R. J., Patterson, I. J., Djang, W. T. (1992). Quantitative cerebral anatomy of the aging human brain: A cross-sectional study using magnetic resonance imaging. *Neurology*, *42*, 527-536.
- Cohen, J. D., Perlstein, W. M., Braver, T. S., Nystrom, L. E., Noll, D. C., Jonides, J., & Smith, E. E. (1997). Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature*, *386*(6625), 604-608.
- Coleman, P. D., & Flood, D. G. (1987). Neuron numbers and dendritic extent in normal aging and Alzheimer's disease. *Neurobiology of Aging*, *8*(6), 521-545.
- Collette, F., Germain, S., Hogge, M., & Van der Linden, M. (2009). Inhibitory control of memory in normal ageing: dissociation between impaired intentional and preserved unintentional processes. *Memory*, *17*(1), 104-122.
- Collette, F., Peters, F., Hogge, M., & Majerus, S. (2007). Mémoire de travail et vieillissement normal. In G. Aubin, F. Coyette, P. Pradat-Diehl & C. Vallat-Azouvi (Eds.), *Neuropsychologie de la Mémoire de Travail* (pp. 353-380). Marseille: Solal.
- Collette, F., Schmidt, C., Scherrer, C., Adam, S., & Salmon, E. (2009). Specificity of inhibitory deficits in normal aging and Alzheimer's disease. *Neurobiology of Aging*, *30*(6), 875-889.
- Collette, F., & Van der Linden, M. (2002). Brain imaging of the central executive component of working memory. *Neurosciences and Biobehavioral Reviews*, *26*(2), 105-125.
- Collette, F., & Van der Linden, M. (2005). La mémoire de travail. In A. M. Ergis, M. C. Gély-Nargeot & M. Van der Linden (Eds.), *Mémoire et maladie d'Alzheimer* (pp. 35-71). Marseille: Solal.
- Collette, F., Van der Linden, M., Laureys, S., Delfiore, G., Degueldre, C., Luxen, A., & Salmon, E. (2005). Exploring the unity and diversity of the neural substrates of executive functioning. *Human Brain Mapping*, *25*(4), 409-423.
- Colzato, L. S., Bajo, M. T., Van den Wildenberg, W., Paolieri, D., Nieuwenhuis, S., La Heij, W., & Hommel, B. (2008). How does bilingualism improve executive control? A comparison of active and reactive inhibition mechanisms. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *34*(2), 302-312.



- Conway, A. R. A., Kane, M. J., Bunting, M. F., Wilhelm, O., Engle, R. W., & Hambrick, D. Z. (2005). Working memory span tasks: A methodological review and user's guide. *Psychonomic Bulletin & Review*, *12*(5), 769-786.
- Craik, F. I. M. (1986). A functional account of age differences in memory. In F. Klix & H. Hagendorf (Eds.), *Human memory and cognitive capabilities: Mechanisms and performances* (pp. 409-422). Amsterdam: Elsevier, North Holland.
- Craik, F. I. M., & Byrd, M. (1982). Aging and cognitive deficits: The role of attentional resources. In F. I. M. Craik & S. E. Trehub (Eds.), *Aging and cognitive processes* (pp. 191-211). New York: Plenum Press.
- Dahlin, E., Neely, A. S., Larsson, A., Backman, L., & Nyberg, L. (2008). Transfer of learning after updating training mediated by the striatum. *Science*, *320*(5882), 1510-1512.
- De Beni, R., & Palladino, P. (2004). Decline in working memory updating through ageing: intrusion error analyses. *Memory*, *12*(1), 75-89.
- De Frias, C. M., Dixon, R. A., & Strauss, E. (2006). Structure of four executive functioning tests in healthy older adults. *Neuropsychology*, *20*(2), 206-214.
- De Frias, C. M., Dixon, R. A., & Strauss, E. (2009). Characterizing executive functioning in older special populations: From cognitively elite to cognitively impaired. *Neuropsychology*, *23*(6), 778-791.
- Dellenbach, M., & Zimprich, D. (2008). Typical intellectual engagement and cognition in old age. *Neuropsychology, development, and cognition B: Aging, neuropsychology and cognition*, *15*(2), 208-231.
- Depp, C. A., Harmell, A., & Vahia, I. V. (2012). Successful cognitive aging. *Current Topics in Behavioral Neurosciences*, *10*, 35-50.
- Dobbs, A. R., & Rule, B. G. (1989). Adult age differences in working memory. *Psychology and Aging*, *4*(4), 500-503.
- Duncan, J., Emslie, H., Williams, P., Johnson, R., & Freer, C. (1996). Intelligence and the Frontal Lobe: The Organization of Goal-Directed Behavior. *Cognitive Psychology*, *30*(3), 257-303.
- Eenshuistra, R. M., Ridderinkhof, K. R., & van der Molen, M. W. (2004). Age-related changes in antisaccade task performance: inhibitory control or working-memory engagement? *Brain and Cognition*, *56*(2), 177-188.

- Engle, R. W. (2002). Working memory capacity as executive attention. *Current Directions in Psychological Science*, *11*(1), 19-23.
- Engle, R. W., & Kane, M. J. (2004). Executive attention, working memory capacity, and a two-factor theory of cognitive control. *The psychology of learning and motivation*, *44*, 145-199.
- Engle, R. W., Kane, M. J., & Tuholski, S. W. (1999). Individual differences in working memory capacity and what they tell us about controlled attention, general fluid intelligence, and functions of the prefrontal cortex. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 102-134). New York: Cambridge University Press.
- Etienne, V., Marin-Lamellet, C., & Laurent, B. (2008). Évolution du contrôle exécutif au cours du vieillissement normal. *Revue Neurologique (Paris)*, *164*(12), 1010-1017.
- Feyereisen, P., & Charlot, V. (2008). Are there uniform age-related changes across tasks involving inhibitory control through access, deletion, and restraint functions? A preliminary investigation. *Experimental Aging Research*, *34*(4), 392-418.
- Fisk, J. E., & Sharp, C. A. (2004). Age-related impairment in executive functioning: updating, inhibition, shifting, and access. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *26*(7), 874-890.
- Fisk, J. E., & Warr, P. (1996). Age and working memory: the role of perceptual speed, the central executive, and the phonological loop. *Psychology and Aging*, *11*(2), 316-323.
- Floden, D., Stuss, D. T., & Craik, F. I. M. (2000). Age differences in performance on two versions of the Brown-Peterson task. *Aging, Neuropsychology and Cognition*, *7*(4), 245-259.
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2004). The relations among inhibition and interference control functions: a latent-variable analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, *133*(1), 101-135.
- Friedman, N. P., Miyake, A., Corley, R. P., Young, S. E., Defries, J. C., & Hewitt, J. K. (2006). Not all executive functions are related to intelligence. *Psychological Science*, *17*(2), 172-179.
- Friedman, N. P., Miyake, A., Robinson, J. L., & Hewitt, J. K. (2011). Developmental trajectories in toddlers' self-restraint predict individual differences in executive functions

- 14 years later: a behavioral genetic analysis. *Developmental Psychology*, 47(5), 1410-1430.
- Friedman, N. P., Miyake, A., Young, S. E., Defries, J. C., Corley, R. P., & Hewitt, J. K. (2008). Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(2), 201-225.
- Fry, A. F., & Hale, S. (1996). Processing Speed, Working Memory, and Fluid Intelligence: Evidence for a Developmental Cascade. *Psychological Science*, 7(4), 237-241.
- Gagnon, L. G., & Belleville, S. (2012). Training of attentional control in mild cognitive impairment with executive deficits: results from a double-blind randomised controlled study. *Neuropsychological Rehabilitation*, 22(6), 809-835.
- Gazzaley, A., Cooney, J. W., Rissman, J., & D'Esposito, M. (2005). Top-down suppression deficit underlies working memory impairment in normal aging. *Nature Neuroscience*, 8(10), 1298-1300.
- Georgiou-Karistianis, N., Tang, J., Mehmedbegovic, F., Farrow, M., Bradshaw, J., & Sheppard, D. (2006). Age-related differences in cognitive function using a global local hierarchical paradigm. *Brain Research*, 1124(1), 86-95.
- Glisky, E. L. (2007). Changes in cognitive function in human aging. In D. R. Riddle (Ed.), *Brain aging: Models, methods, and mechanisms* (pp. 3-20). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Godefroy, O. (2003). Frontal syndrome and disorders of executive functions. *Journal of Neurology*, 250(1), 1-6.
- Godefroy, O., Cabaret, M., Petit-Chenal, V., Pruvo, J. P., & Rousseaux, M. (1999). Control functions of the frontal lobes. Modularity of the central-supervisory system? *Cortex*, 35(1), 1-20.
- Gunning-Dixon, F. M., Brickman, A. M., Cheng, J. C., & Alexopoulos, G. S. (2009). Aging of cerebral white matter: a review of MRI findings. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 24(2), 109-117.
- Gunning-Dixon, F. M., & Raz, N. (2003). Neuroanatomical correlates of selected executive functions in middle-aged and older adults: a prospective MRI study. *Neuropsychologia*, 41(14), 1929-1941.

- Gunstad, J., Paul, R. H., Brickman, A. M., Cohen, R. A., Arns, M., Roe, D., & Gordon, E. (2006). Patterns of cognitive performance in middle-aged and older adults: A cluster analytic examination. *Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology*, *19*(2), 59-64.
- Hasher, L., Lustig, C., & Zacks, R. T. (2007). Inhibitory mechanisms and the control of attention. In A. R. A. Conway, C. Jarrold, M. J. Kane, A. Miyake & J. Towse (Eds.), *Variation in working memory* (pp. 227-249). New York, NY: Oxford University Press.
- Hasher, L., Stoltzfus, E. R., Zacks, R. T., & Rypma, B. (1991). Age and inhibition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *17*(1), 163-169.
- Hasher, L., & Zacks, R. T. (1988). Working memory, comprehension, and aging: A review and a new view. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (Vol. 22, pp. 193-225). San Diego, CA: Academic Press.
- Hedden, T., & Yoon, C. (2006). Individual differences in executive processing predict susceptibility to interference in verbal working memory. *Neuropsychology*, *20*(5), 511-528.
- Hilborn, J. V., Strauss, E., Hultsch, D. F., & Hunter, M. A. (2009). Intraindividual variability across cognitive domains: investigation of dispersion levels and performance profiles in older adults. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *31*(4), 412-424.
- Hillman, C. H., Erickson, K. I., & Kramer, A. F. (2008). Be smart, exercise your heart: exercise effects on brain and cognition. *Nature Reviews: Neuroscience*, *9*(1), 58-65.
- Hofmann, W., Schmeichel, B. J., & Baddeley, A. D. (2012). Executive functions and self-regulation. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(3), 174-180.
- Horn, J. L. (1986). Intellectual ability concepts. In R. J. Sternberg (Ed.), *Advances in the psychology of human intelligence* (pp. 93-102). Heidelberg: Springer-Verlag.
- Hull, R., Martin, R. C., Beier, M. E., Lane, D., & Hamilton, A. C. (2008). Executive function in older adults: a structural equation modeling approach. *Neuropsychology*, *22*(4), 508-522.
- Hultsch, D. F., MacDonald, S. W., & Dixon, R. A. (2002). Variability in reaction time performance of younger and older adults. *Journal of Gerontology B: Psychological Sciences and Social Sciences*, *57*(2), 101-115.

- Ilkowska, M., & Engle, R. W. (2010). Trait and state differences in working memory capacity. In A. Gruszka, G. Matthews & B. Szymura (Eds.), *Handbook of individual differences in cognition: Attention, memory, and executive control* (pp. 295-320). New York: Springer.
- Inman, V. W., & Parkinson, S. R. (1983). Differences in Brown-peterson Recall As a Function of Age and Retention Interval. *Journal of Gerontology*, 38(1), 58-64.
- Jefferson, A. L., Paul, R. H., Ozonoff, A., & Cohen, R. A. (2006). Evaluating elements of executive functioning as predictors of instrumental activities of daily living (IADLs). *Archives of Clinical Neuropsychology*, 21(4), 311-320.
- Jurado, M. B., & Rosselli, M. (2007). The elusive nature of executive functions: a review of our current understanding. *Neuropsychology Reviews*, 17(3), 213-233.
- Kane, M. J., Conway, A. R. A., Hambrick, D. Z., & Engle, R. W. (2007). Variation in working memory capacity as variation in executive attention and control. In A. R. A. Conway, C. Jarrold, M. J. Kane, A. Miyake & J. Towse (Eds.), *Variation in working memory*. New York: Oxford University Press.
- Keys, B. A., & White, D. A. (2000). Exploring the relationship between age, executive abilities, and psychomotor speed. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 6(1), 76-82.
- Kieley, J. M., & Hartley, A. A. (1997). Age-related equivalence of identity suppression in the Stroop color-word task. *Psychology and Aging*, 12(1), 22-29.
- Kline, R. B. (2011). *Principles and practice of structural equation modeling, third edition*. New York: The Guilford Press.
- Kramer, A. F., Erickson, K. I., & Colcombe, S. J. (2006). Exercise, cognition, and the aging brain. *Journal of Applied Physiology*, 101(4), 1237-1242.
- Kramer, A. F., Humphrey, D. G., Larish, J. F., Logan, G. D., & Strayer, D. L. (1994). Aging and inhibition: beyond a unitary view of inhibitory processing in attention. *Psychology and Aging*, 9(4), 491-512.
- Kray, J. (2006). Task-set switching under cue-based versus memory-based switching conditions in younger and older adults. *Brain Research*, 1105(1), 83-92.
- Kray, J., Li, K. Z., & Lindenberger, U. (2002). Age-related changes in task-switching components: the role of task uncertainty. *Brain and Cognition*, 49(3), 363-381.

- Kray, J., & Lindenberger, U. (2000). Adult age differences in task switching. *Psychology and Aging, 15*(1), 126-147.
- Kuo, H. K., Sorond, F., Iloputaife, I., Gagnon, M., Milberg, W., & Lipsitz, L. A. (2004). Effect of blood pressure on cognitive functions in elderly persons. *Journal of Gerontology A: Biological Sciences and Medical Sciences, 59*(11), 1191-1194.
- La Rue, A., Koehler, K. M., Wayne, S. J., Chiulli, S. J., Haaland, K. Y., & Garry, P. J. (1997). Nutritional status and cognitive functioning in a normally aging sample: a 6-y reassessment. *American Journal of Clinical Nutrition, 65*(1), 20-29.
- Lamar, M., Zonderman, A. B., & Resnick, S. (2002). Contribution of specific cognitive processes to executive functioning in an aging population. *Neuropsychology, 16*(2), 156-162.
- Launer, L. J. (2005). The epidemiologic study of dementia: a life-long quest? *Neurobiology of Aging, 26*(3), 335-340.
- Lehto, J. (1996). Are executive function tests dependent on working memory capacity? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology, 49A*(1), 29-50.
- Lépine, R., Bernardin, S., & Barouillet, P. (2005). Attention switching and working memory spans. *European Journal of Cognitive Psychology, 17*(3), 329-345.
- Levine, B., Stuss, D. T., Milberg, W. P., Alexander, M. P., Schwartz, M., & MacDonald, R. (1998). The effects of focal and diffuse brain damage on strategy application: Evidence from focal lesions, traumatic brain injury and normal aging. *Journal of the International Neuropsychological Society, 4*(3), 247-264.
- Lezak, M. D., Howieson, D. B., & Loring, D. W. (2004). *Neuropsychological Assessment (4th edition)*. New York: Oxford University Press.
- Lien, M. C., Ruthruff, E., & Kuhns, D. (2008). Age-related differences in switching between cognitive tasks: does internal control ability decline with age? *Psychology and Aging, 23*(2), 330-341.
- Lindenberger, U., & Baltes, P. B. (1997). Intellectual functioning in old and very old age: cross-sectional results from the Berlin Aging Study. *Psychology and Aging, 12*(3), 410-432.
- Logan, G. D. (1985). Executive control of thought and action. *Acta psychologica, 60*, 193-210.

- Logan, G. D. (1994). On the ability to inhibit thought and action: A user's guide to the stop signal paradigm. In D. Dagenbach & T. H. Carr (Eds.), *Inhibitory processes in attention, memory, and language* (pp. 189-239). San Diego, CA: Academic Press.
- Lustig, C., Hasher, L., & Zacks, R. (2007). Inhibitory deficit theory: Recent developments in a "new view". In D. S. Gorfein & C. M. MacLeod (Eds.), *Inhibition in cognition* (pp. 145-162). Washington, DC: American Psychological Association.
- Lustig, C., May, C. P., & Hasher, L. (2001). Working memory span and the role of proactive interference. *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*(2), 199-207.
- Luszcz, M. (2011). Executive function and cognitive aging. In K. Schaie & S. Willis (Eds.), *Handbook of the psychology of aging, 7th edition* (pp. 59-72). London: Elsevier inc.
- Madden, D. J., Bennett, I. J., & Song, A. W. (2009). Cerebral white matter integrity and cognitive aging: contributions from diffusion tensor imaging. *Neuropsychology Reviews*, *19*(4), 415-435.
- May, C. P., Hasher, L., & Kane, M. J. (1999). The role of interference in memory span. *Memory and Cognition*, *27*(5), 759-767.
- McCabe, D. P., Roediger, H. L., McDaniel, M. A., Balota, D. A., & Hambrick, D. Z. (2010). The relationship between working memory capacity and executive functioning: evidence for a common executive attention construct. *Neuropsychology*, *24*(2), 222-243.
- McCabe, J., & Hartman, M. (2003). Examining the locus of age effects on complex span tasks. *Psychology and Aging*, *18*(3), 562-572.
- McDaniel, M. A., Glisky, E. L., Rubin, S. R., Guynn, M. J., & Routhieaux, B. C. (1999). Prospective memory: a neuropsychological study. *Neuropsychology*, *13*(1), 103-110.
- Meguro, Y., Fujii, T., Yamadori, A., Tsukiura, T., Suzuki, K., Okuda, J., & Osaka, M. (2000). The nature of age-related decline on the reading span task. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *22*(3), 391-398.
- Meiran, N., Gotler, A., & Perlman, A. (2001). Old age is associated with a pattern of relatively intact and relatively impaired task-set switching abilities. *Journal of Gerontology B: Psychological Sciences and Social Sciences*, *56*(2), 88-102.
- Meltzoff, J. (1998). *Critical thinking about research: psychology and related fields*. Washington, DC: American Psychological Association.

- Mitrushina, M., Uchiyama, C., & Satz, P. (1995). Heterogeneity of cognitive profiles in normal aging: implications for early manifestations of Alzheimer's disease. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *17*(3), 374-382.
- Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The Nature and Organization of Individual Differences in Executive Functions: Four General Conclusions. *Current Directions in Psychological Sciences*, *21*(1), 8-14.
- 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. *Cognitive Psychology*, *41*(1), 49-100.
- Monchi, O., Petrides, M., Strafella, A. P., Worsley, K. J., & Doyon, J. (2006). Functional role of the basal ganglia in the planning and execution of actions. *Annals of Neurology*, *59*(2), 257-264.
- Monchi, O., Taylor, J. G., & Dagher, A. (2000). A neural model of working memory processes in normal subjects, Parkinson's disease and schizophrenia for fMRI design and predictions. *Neural Networks*, *13*(8-9), 953-973.
- Monsell, S. (1996). Control of mental processes. In V. Bruce (Ed.), *Unsolved mysteries of the mind: Tutorial essays in cognition* (pp. 93-148). Oxford, England: Erlbaum (Uk) Taylor & Francis, Publ.
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Science*, *7*(3), 134-140.
- Morris, M. C. (2012). Nutritional determinants of cognitive aging and dementia. *Proceedings of the Nutritional Society*, *71*(1), 1-13.
- Morris, N., & Jones, D. M. (1990). Memory updating in working memory: The role of the central executive. *British Journal of Psychology*, *81*(2), 111-121.
- Nelson, E. A., & Dannefer, D. (1992). Aged heterogeneity: fact or fiction? The fate of diversity in gerontological research. *Gerontologist*, *32*(1), 17-23.
- Niranjan, A., Corujo, A., Ziegelstein, R. C., & Nwulia, E. (2012). Depression and heart disease in US adults. *General Hospital Psychiatry*, *34*(3), 254-261.
- Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behaviour. In R. J. Davidson, G. E. Schwartz & D. Shapiro (Eds.), *Consciousness and self-regulation: Advances in research and theory (Vol. 4)*. New York: Plenum Press.



- Novak, V., & Hajjar, I. (2010). The relationship between blood pressure and cognitive function. *Nature Reviews: Cardiology*, 7(12), 686-698.
- O'Reilly, R. C., & Frank, M. J. (2006). Making working memory work: a computational model of learning in the prefrontal cortex and basal ganglia. *Neural Computation*, 18(2), 283-328.
- Parisi, J. M., Stine-Morrow, E. A., Noh, S. R., & Morrow, D. G. (2009). Predispositional engagement, activity engagement, and cognition among older adults. *Neuropsychology, development, and cognition. Section B, Aging, neuropsychology and cognition*, 16(4), 485-504.
- Park, D. C., Smith, A. D., Lautenschlager, G., Earles, J. L., Frieske, D., Zwahr, M., & Gaines, C. L. (1996). Mediators of long-term memory performance across the life span. *Psychology and Aging*, 11(4), 621-637.
- Penke, L., Munoz Maniega, S., Murray, C., Gow, A. J., Hernandez, M. C., Clayden, J. D., & Deary, I. J. (2010). A general factor of brain white matter integrity predicts information processing speed in healthy older people. *Journal of Neuroscience*, 30(22), 7569-7574.
- Peterson, L. R., & Peterson, M. J. (1959). Short-term retention of individual verbal items. *Journal of Experimental Psychology*, 58, 193-198.
- Phillips, L. H., & Hamilton, C. (2001). The working memory model in adult aging research. In J. Andrade (Ed.), *Working Memory in Perspective* (pp. 101-125). New York: Taylor & Francis Group.
- Phillips, L. H., & Henry, J. D. (2008). Adult aging and executive functioning. In V. Anderson, R. Jacobs & P. J. Anderson (Eds.), *Executive functions and the frontal lobes: A lifespan perspective* (pp. 57-79). New York: Taylor & Francis Group.
- Podell, J. E., Sambataro, F., Murty, V. P., Emery, M. R., Tong, Y., Das, S., & Mattay, V. S. (2012). Neurophysiological correlates of age-related changes in working memory updating. *Neuroimage*, 62(3), 2151-2160.
- Pushkar Gold, D., Andres, D., Etezadi, J., Arbuckle, T., Schwartzman, A., & Chaikelson, J. (1995). Structural equation model of intellectual change and continuity and predictors of intelligence in older men. *Psychology and Aging*, 10, 294-303.
- Rabbitt, P. (1993). Does it all go together when it goes? The Nineteenth Bartlett Memorial Lecture. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 46A(3), 385-434.

- Radvansky, G. A., Copeland, D. E., Berish, D. E., & Dijkstra, K. (2003). Aging and situation model updating: *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *10*(2), 158-166.
- Rapp, M. A., Schnaider-Beerli, M., Sano, M., Silverman, J. M., & Haroutunian, V. (2005). Cross-domain variability of cognitive performance in very old nursing home residents and community dwellers: relationship to functional status. *Gerontology*, *51*(3), 206-212.
- Raz, N. (2000). Aging of the brain and its impact on cognitive performance: Integration of structural and functional findings. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.), *The handbook of aging and cognition* (pp. 1-90). Mahwah: Laurence 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*(2), 501-511.
- Raz, N., Gunning-Dixon, F. M., Head, D., Dupuis, J. H., & Acker, J. D. (1998). Neuroanatomical correlates of cognitive aging: Evidence from structural magnetic resonance imaging. *Neuropsychology*, *12*(1), 95-114.
- Raz, N., & Kennedy, K. M. (2009). A systems approach to age-related change: neuroanatomic changes, their modifiers, and cognitive correlates. In W. Jagust & M. D'Esposito (Eds.), *Imaging the aging brain* (pp. 43-70). New York: Oxford University Press.
- Raz, N., & Rodrigue, K. M. (2006). Differential aging of the brain: patterns, cognitive correlates and modifiers. *Neuroscience and Biobehavioral Review*, *30*(6), 730-748.
- Raz, N., Rodrigue, K. M., Kennedy, K. M., & Acker, J. D. (2007). Vascular health and longitudinal changes in brain and cognition in middle-aged and older adults. *Neuropsychology*, *21*(2), 149-157.
- Redick, T. S., Unsworth, N., Kelly, A. J., Engle, R. W. (2012) Faster, smarter? Working memory capacity and perceptual speed in relation to fluid intelligence. *Journal of Cognitive Psychology*, *24*(7), 844-854.
- Reuter-Lorenz, P. A., & Sylvester, C. Y. C. (2005). *The Cognitive Neuroscience of Working Memory and Aging Cognitive Neuroscience of Aging: Linking Cognitive and Cerebral Aging* (pp. 186-217). New York: Oxford University Press.
- Robbins, T. W. (1996). Dissociating executive functions of the prefrontal cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Science*, *351*(1346), 1463-1470.

- Rouleau, N., & Belleville, S. (1996). Irrelevant speech effect in aging: an assessment of inhibitory processes in working memory. *Journal of Gerontology B: Psychological Science and Social Science*, 51(6), 356-363.
- Rowe, J. W., & Kahn, R. L. (1987). Human aging: usual and successful. *Science*, 237(4811), 143-149.
- Royall, D. R., Palmer, R., Chiodo, L. K., & Polk, M. J. (2004). Declining executive control in normal aging predicts change in functional status: the Freedom House Study. *Journal of the American Geriatric Society*, 52(3), 346-352.
- Salami, A., Eriksson, J., Nilsson, L. G., & Nyberg, L. (2012). Age-related white matter microstructural differences partly mediate age-related decline in processing speed but not cognition. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1822(3), 408-415.
- Salthouse, T. A. (1992). Influence of processing speed on adult age differences in working memory. *Acta Psychologica*, 79(2), 155-170.
- Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review*, 103(3), 403-428.
- Salthouse, T. A., Atkinson, T. M., & Berish, D. E. (2003). Executive functioning as a potential mediator of age-related cognitive decline in normal adults. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132(4), 566-594.
- Salthouse, T. A., & Babcock, R. L. (1991). Decomposing adult-age differences in working memory. *Developmental Psychology*, 27(5), 763-776.
- Salthouse, T. A., Babcock, R. L., & Shaw, R. J. (1991). Effects of adult age on structural and operational capacities in working memory. *Psychology and Aging*, 6(1), 118-127.
- Salthouse, T. A., Berish, D. E., & Siedlecki, K. L. (2004). Construct validity and age sensitivity of prospective memory. *Memory and Cognition*, 32(7), 1133-1148.
- Salthouse, T. A., Fristoe, N., McGuthry, K. E., & Hambrick, D. Z. (1998). Relation of task switching to speed, age, and fluid intelligence. *Psychology and Aging*, 13(3), 445-461.
- Salthouse, T. A., & Meinzer, E. J. (1995). Aging, inhibition, working memory, and speed. *Journal of Gerontology B : Psychological Sciences and Social Sciences*, 50(6), 297-306.
- Satz, P., Cole, M. A., Hardy, D. J., & Rassovsky, Y. (2011). Brain and cognitive reserve: mediator(s) and construct validity, a critique. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 33(1), 121-130.

- Schmiedek, F., Hildebrandt, A., Lovden, M., Lindenberger, U., & Wilhelm, O. (2009). Complex span versus updating tasks of working memory: the gap is not that deep. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 35(4), 1089-1096.
- Schooler, C., Mulatu, M. S., & Oates, G. (1999). The continuing effects of substantively complex work on the intellectual functioning of older workers. *Psychology and Aging*, 14(3), 483-586.
- Schretlen, D. J., Munro, C. A., Anthony, J. C., & Pearlson, G. D. (2003). Examining the range of normal intraindividual variability in neuropsychological test performance. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 9(6), 864-870.
- Seeman, T. E., Lusignolo, T. M., Albert, M., & Berkman, L. (2001). Social relationships, social support, and patterns of cognitive aging in healthy, high-functioning older adults: MacArthur studies of successful aging. *Health Psychology*, 20(4), 243-255.
- Singh-Manoux, A., Kivimaki, M., Glymour, M. M., Elbaz, A., Berr, C., Ebmeier, K. P., & Dugravot, A. (2012). Timing of onset of cognitive decline: results from Whitehall II prospective cohort study. *British Medical Journal*, 344, 7622.
- Singh-Manoux, A., & Marmot, M. (2005). High blood pressure was associated with cognitive function in middle-age in the Whitehall II study. *Journal of Clinical Epidemiology*, 58(12), 1308-1315.
- Ska, B., & Joannette, Y. (2006). Vieillesse normale et cognition. *Médecine/Sciences*, 22, 284-287.
- Smith, E. E., & Jonides, J. (1999). Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, 283(5408), 1657-1661.
- Sole-Padullés, C., Bartres-Faz, D., Junque, C., Vendrell, P., Rami, L., Clemente, I. C., . . . Molinuevo, J. L. (2009). Brain structure and function related to cognitive reserve variables in normal aging, mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Neurobiology of Aging*, 30(7), 1114-1124.
- Stern, Y. (2002). What is cognitive reserve? Theory and research application of the reserve concept. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 8(3), 448-460.
- Stern, Y. (2006). Cognitive reserve and Alzheimer disease. *Alzheimer Disease and Associated Disorders*, 20(3 Suppl 2), 69-74.

- Stern, Y. (2009). Cognitive reserve. *Neuropsychologia*, 47(10), 2015-2028.
- Strauss, E., Sherman, E. M. S., & Spreen, O. (2006). *A compendium of neuropsychological tests: Administration, norms and commentary*. New York: Oxford University Press.
- Stuss, D. T. (2011). Functions of the frontal lobes: relation to executive functions. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 17(5), 759-765.
- Stuss, D. T., Shallice, T., Alexander, M. P., & Picton, T. W. (1995). A multidisciplinary approach to anterior attentional functions. *Annals of the New York Academy of Science*, 769, 191-211.
- Sweeney, J. A., Rosano, C., Berman, R. A., & Luna, B. (2001). Inhibitory control of attention declines more than working memory during normal aging. *Neurobiology of Aging*, 22(1), 39-47.
- Towse, J. N., Hitch, G. J., & Hutton, U. (1998). A reevaluation of working memory capacity in children. *Journal of memory and language*, 39, 195-217.
- Towse, J. N., Hitch, G. J., & Hutton, U. (2000). On the interpretation of working memory span in adults. *Memory & Cognition*, 28(3), 341-348.
- Troyer, A. K., Graves, R. E., & Cullum, C. C. (1994). Executive functioning as a mediator of the relationship between age and episodic memory in healthy aging. *Aging, Neuropsychology and Cognition*, 1, 45-53.
- Unsworth, N., & Engle, R. W. (2007). The nature of individual differences in working memory capacity: active maintenance in primary memory and controlled search from secondary memory. *Psychological Review*, 114(1), 104-132.
- Unsworth, N., & Engle, R. W. (2008). Speed and accuracy of accessing information in working memory: an individual differences investigation of focus switching. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 34(3), 616-630.
- Valdois, S., Joannette, Y., Poissant, A., Ska, B., & Dehaut, F. (1990). Heterogeneity in the cognitive profile of normal elderly. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 12(4), 587-596.
- Van der Linden, M., Beerten, A., & Pesenti, M. (1998). Age-related differences in random generation. *Brain and Cognition*, 38(1), 1-16.
- Van der Linden, M., Bredart, S., & Beerten, A. (1994). Age-related differences in updating working memory. *British Journal of Psychology*, 85(1), 145-152.

- Van der Linden, M., Hupet, M., Feyereisen, P., Schelstraete, M.-A., Bestgen, Y., Bruyer, R., Seron, X. (1999). Cognitive mediators of age-related differences in language comprehension and verbal memory performance. *Aging, Neuropsychology and Cognition*, 6(1), 32-55.
- Vaughan, L., & Giovanello, K. (2010). Executive function in daily life: Age-related influences of executive processes on instrumental activities of daily living. *Psychology and Aging*, 25(2), 343-355.
- Verhaeghen, P. (2011). Aging and executive control: Reports of a demise greatly exaggerated. *Current Directions in Psychological Science*, 20(3), 174-180.
- Verhaeghen, P., & Basak, C. (2005). Ageing and switching of the focus of attention in working memory: results from a modified N-back task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 58(1), 134-154.
- Verhaeghen, P., & Cerella, J. (2002). Aging, executive control, and attention: a review of meta-analyses. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 26(7), 849-857.
- Verhaeghen, P., & De Meersman, L. (1998). Aging and the Stroop effect: a meta-analysis. *Psychology and Aging*, 13(1), 120-126.
- Verhaeghen, P., & Salthouse, T. A. (1997). Meta-analyses of age-cognition relations in adulthood: estimates of linear and nonlinear age effects and structural models. *Psychological Bulletin*, 122(3), 231-249.
- Vicario, A., Martinez, C. D., Baretto, D., Diaz Casale, A., & Nicolosi, L. (2005). Hypertension and cognitive decline: impact on executive function. *Journal of Clinical Hypertension (Greenwich)*, 7(10), 598-604.
- Villeneuve, S., Belleville, S., Massoud, F., Bocti, C., & Gauthier, S. (2009). Impact of vascular risk factors and diseases on cognition in persons with mild cognitive impairment. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 27(4), 375-381.
- Wager, T. D., & Smith, E. E. (2003). Neuroimaging studies of working memory: a meta-analysis. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 3(4), 255-274.
- Walhovd, K. B., Westlye, L. T., Amlien, I., Espeseth, T., Reinvang, I., Raz, N., . . . Fjell, A. M. (2011). Consistent neuroanatomical age-related volume differences across multiple samples. *Neurobiology of Aging*, 32(5), 916-932.

- Wasylyshyn, C., Verhaeghen, P., & Sliwinski, M. J. (2011). Aging and task switching: A meta-analysis. *Psychology and Aging, 26*(1), 15-20.
- Wecker, N. S., Kramer, J. H., Hallam, B. J., & Delis, D. C. (2005). Mental flexibility: age effects on switching. *Neuropsychology, 19*(3), 345-352.
- Wecker, N. S., Kramer, J. H., Wisniewski, A., Delis, D. C., & Kaplan, E. (2000). Age effects on executive ability. *Neuropsychology, 14*(3), 409-414.
- West, R., & Craik, F. I. (2001). Influences on the efficiency of prospective memory in younger and older adults. *Psychology and Aging, 16*(4), 682-696.
- West, R., & Travers, S. (2008). Differential effects of aging on processes underlying task switching. *Brain and Cognition, 68*(1), 67-80.
- West, R. L. (1996). An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. *Psychological Bulletin, 120*(2), 272-292.
- Ylikoski, R., Ylikoski, A., Keskivaara, P., Tilvis, R., Sulkava, R., & Erkinjuntti, T. (1999). Heterogeneity of cognitive profiles in aging: successful aging, normal aging, and individuals at risk for cognitive decline. *European Journal of Neurology, 6*(6), 645-652.

## **ANNEXE I**

### **Article 3**



### **Apport de chaque coauteur**

**Stéphanie Sylvain-Roy** a fait la revue de la littérature, analysé les données, et rédigé l'article.

**Louis Bherer** a participé à la revue de la littérature, élaboré les objectifs et hypothèses de la recherche, créé les tâches expérimentales, recruté et testé les participants. Il a ensuite collaboré à l'analyse des données et à la rédaction de l'article.

**Sylvie Belleville** a été impliquée, en tant que directrice de recherche, à chacune des étapes énumérées ci-haut.

**Contribution of temporal preparation and processing speed to simple reaction time in persons with Alzheimer's disease and mild cognitive impairment**

Stéphanie Sylvain-Roy, Louis Bherer, & Sylvie Belleville

Publié en 2010 dans *Brain and Cognition*, 74(3), 255-261.

### **Abstract**

Temporal preparation was assessed in 15 Alzheimer's disease (AD) patients, 20 persons with mild cognitive impairment (MCI) and 28 healthy older adults. Participants completed a simple reaction time task in which the preparatory interval duration varied randomly within two blocks (short versus long temporal window). Results indicated that AD and MCI patients had difficulty preparing for the shortest preparatory interval of the short temporal window. AD and MCI patients also had difficulty maintaining an optimal level of preparation up to 5 seconds within the short temporal window. These results suggest that AD and MCI patients might show difficulty preparing for rapidly occurring events and maintaining preparation over time. This phenomenon should be considered when using reaction time measures with such patients.

**Key-words:** Temporal preparation, Simple reaction time, Processing speed, Alzheimer's disease, Mild cognitive impairment

## **Introduction**

Reaction times (RT) are widely used in research on Alzheimer's disease (AD) as a dependent measure of a variety of cognitive processes, including semantic processing, procedural memory and attention (Nebes & Brady, 1992). Reliance on RT measures is based on the assumption that they provide a very accurate measurement of the underlying cognitive process (Salthouse & Hedden, 2002; Wenger & Townsend, 2000), compared to other dependent variables such as error rates, and that they reflect the chronometric properties of cognitive processes. Yet, in addition to involving stimulus processing and response execution, RTs are influenced by attentional processes that operate prior to stimulus occurrence (Henderson & Dittrich, 1998). These are referred to as preparatory processes and reflect the ability to activate and maintain an optimal processing state prior to the execution of an action. While preparatory processes typically result in improving response latency, their impact on RT is highly dependent on task design and conditions. An altered capacity to prepare a forthcoming response can obviously result in impaired performance on RT tasks, irrespective of the processes meant to be measured. It can also have an impact on any situation requiring a rapid processing of incoming information (Nebes & Brady, 1993). Thus, inefficient preparation capacities could contribute to reducing performance on a variety of other cognitive tasks that include RT as a dependent variable. It is therefore critical to better understand the preparatory processes in AD and to assess whether task parameters impact on the AD-related changes in preparation. In addition to this, studying preparatory effects as assessed in RT tasks in AD patients should bring a better understanding of how AD alters basic attentional mechanisms.

It is generally assumed that response preparation will be optimal if the nature of a forthcoming stimulus and the associated response are known in advance. However, knowing when the response must be provided is also a central aspect of preparatory behaviour. Non-specific or temporal preparation refers to the ability to use temporal information in order to synchronize an action in time. In RT tasks, temporal preparation occurs during the preparatory interval (PI), namely the interval that separates the warning signal from the stimulus that requires a response. Within a block of trials, PI can be fixed or can vary randomly across trials. For a variable PI design in which each PI duration occurs the same number of times within a given block of trials, the subjective probability of stimulus occurrence increases during the PI. For instance, if three PI durations (e.g. 1, 2 and 3 seconds) are used within a single block, the probability of stimulus occurrence is 33% after 1 second, 50% after 2 seconds, and 100% after 3 seconds. Increasing the probability of stimulus occurrence results in a higher level of preparedness with time, therefore enabling a faster response when the stimulus occurs (Niemi, 1979). Thus, in a variable PI design, the level of uncertainty decreases as PI duration increases, and this allows the participant to reach an optimal level of preparedness at longer PIs. In healthy young adults, this usually leads to faster RT with longer PI duration (see Niemi & Näätänen, 1981, for a review).

A modification of this temporal PI effect reflects an impaired capacity to prepare optimally as a function of time and as a function of the probability of stimulus occurrence. For instance, healthy older adults do not prepare as much as younger adults for events that have a low probability of occurrence. This is unrelated to the time frame in which these events occur, since it has been observed with relatively short (1-5 s) and long (5-9s) PI durations (Bherer &

Belleville, 2004a; 2004b). A preparation deficit can also be observed in Parkinson's disease. Bherer, Belleville and Gilbert (2003) found that Parkinson's disease patients fail to prepare at the shortest PI (1 second) in simple RT conditions, and that this failure to prepare was associated with decline in working memory performances, as assessed with neuropsychological tests. The authors thus argued that impaired preparation in Parkinson's disease patients is likely due to an impaired ability to activate and maintain an action schema over the full range of preparatory intervals (1-5s).

The studies reported above suggest that preparation effect, as observed in simple reaction time tasks, is based on effortful and attention demanding processes (e.g. Frith & Done, 1986). In fact, impaired preparation has also been reported in patients with lesions to the right dorsolateral frontal cortex (Stuss et al., 2005), as well as in healthy adults undergoing transcranial magnetic stimulation of that brain area (Vallesi, Shallice & Walsh, 2007). Attention is known to be impaired in AD (e.g. Gorus et al., 2006; see Perry & Hodges, 1999 for a review) even in its pre-clinical phase, known as mild cognitive impairment (MCI; e.g. Rapp & Reischies, 2005; Belleville, Bherer, Lepage, Chertkow & Gauthier, 2008; Belleville, Chertkow & Gauthier, 2007). A deficit of preparation may thus occur early in the evolution of AD and, considering the attentional deficits found in MCI, preparation might even be impaired before the onset of the disease.

However, no study has directly examined preparation effect in AD patients. Storandt & Beaudreau (2004) used a variable PI design with mild AD patients and found no impairment compared to non demented participants. The authors concluded that performance in simple RT

tasks in which PI was randomly varied within each block was not a good indicator of AD. However these findings are based on performance averaged over different PI durations and thus cannot be used to address the question of preparation in AD. One cannot exclude the possibility that a difference between demented and non demented individuals would have been observed if they had assessed the temporal preparatory effect by looking at the relationship between RT and PI duration, as is typically done in a preparation design. Recently, Bradshaw et al. (2006) also found no attentional impairment for AD patients compared to healthy controls using a simple RT task with variable PI but they used PI durations of only up to 2 seconds. Both studies conclude that performance was normal in AD, which is surprising given that AD patients often show impairment in attentional control tests (Belleville, Rouleau, Van der Linden & Collette, 2003; Belleville, Chertkow & Gauthier, 2007) and increased response delay compared to normal older adults in RT tasks (Nebes & Madden, 1988; Pirozzolo, Christensen, Ogle, Hansch, & Thompson, 1981). One potential explanation for the absence of a difference between healthy older adults and AD patients in those previous studies is the fact that the RT-PI function was not explored and that the results were not provided separately for the different PI durations.

Finally, the contribution of general slowing to preparation has not been assessed in AD. A linear function has been found to exist between the RTs of young adults and those of healthy older adults, suggesting that aging creates generalized slowing (e.g. Cerella, 1985; Salthouse, 1985). Nebes and Madden (1988) have shown that such a linear function also exists between the RTs of AD patients and those of young controls, suggesting that AD would slow most cognitive operations by a constant proportion, and slowing was shown to vary as a

function of disease severity (Nebes & Brady, 1992). As Salthouse (1996) points out in studies of normal aging, it is crucial to consider group differences in processing speed when interpreting interaction effects. Because they rely on interaction effects on RTs, preparation paradigms might be particularly sensitive to the impact of the AD-related generalized slowing. One way to control for this is to perform a logarithmic transformation of the RTs of each participant (e.g. Lindholm & Parkinson, 1983), a technique frequently used in aging studies. Such transformations are lacking in previous studies that assessed preparation effects in AD and MCI patients.

Based on the abovementioned studies, no definitive conclusion can be drawn regarding temporal preparation capacities in AD. The purpose of the present study was to examine if AD impairs temporal preparation based on the probability of stimulus occurrence in a simple RT task with a variable PI design. In order to isolate the attentional component of temporal preparation, the cognitive and motor processes involved in this task are analyzed separately. Using a logarithmic transformation of participants' RTs, the present study also explores whether preparation is impaired beyond reduced processing speed in AD and MCI.

## **Methods**

### **Participants**

Three groups of participants were recruited for this study: patients with AD, patients with MCI, and healthy controls (HC). Table 1 provides a detailed description of the sample. The three groups did not differ in terms of their level of education,  $F(2,60) = 2.79, p = n.s.$  As to their mean age, healthy controls did not differ from MCI patients [ $t(46) = 1.02, ns$ ] nor from



AD patients [ $t(41) = 1.88, ns$ ]; however, MCI patients were significantly younger than the AD group, [ $t(33) = 2.64, p < .05, d = .94$ ].

AD patients and persons with MCI were diagnosed by a neurologist or a geriatrician from collaborating centers in Montreal. AD patients met the clinical criteria for dementia of the Alzheimer type of the DSM-IV (APA, 1994) as well as the NINCDS-ADRDA research criteria for probable AD (McKhann et al., 1984). Persons with MCI were diagnosed as such based on Petersen et al.'s criteria (2001). They showed a memory deficit on objective measures (i.e. at least 1.5 SD below normative value on any of the memory measures described below) but their scores on the Mini Mental State Examination (MMSE; Folstein, Folstein, & McHugh, 1975) and Mattis Dementia Rating Scale (MDRS; Mattis, 1976) were above the cut-off for dementia. They were functionally independent as judged by their responses on the Functional Autonomy Measurement System (SMAF; Hébert, Guilbault, Desrosiers & Dubuc, 2001) as well as by a clinical interview with them and a close informant when possible. Concerning the subtypes of MCI, the group was composed of 13 persons with amnesic multiple domain MCI, six with amnesic single domain MCI, and one with executive single domain MCI. Healthy controls were recruited from the local community via advertisements in elderly people centers or in magazines for seniors. None of them met criteria for MCI or AD. Participants of all three groups lived in the same community.

In order to characterize the sample, all participants were administered a battery of clinical and neuropsychological tests. To evaluate global cognitive functioning, the Mini Mental State Examination (MMSE; Folstein, Folstein, & McHugh, 1975) and the Mattis

Dementia Rating Scale (MDRS; Mattis, 1976) were administered. The battery of neuropsychological tests included tests of memory (the story recall of the Batterie d'Efficiency Mnésique; BEM 144; Signoret, 1991; and a free and cued word recall; Van der Linden, Coyette, Poitrenaud, & Gremem, 2004), tests of executive functions (Stroop-Victoria; Regard, 1981) and speed (Digit-Symbol Coding subtest of the Wechsler Adult Intelligence Scale; Wechsler, 1997), and tests of visual construction and perception (Rey complex figure test; Meyers & Meyers, 1995; and Judgement of Line Orientation; Benton, Hamsher, Varney & Spreen, 1983). The Functional Autonomy Measurement System (SMAF; Hébert, Guilbault, Desrosiers & Dubuc, 2001) was also administered to participants. A detailed description of each group's results on these tests is provided in Table 1.

The following conditions resulted in exclusion from the study: uncorrected vision or hearing deficit, presence or history of alcoholism, severe psychiatric disorder, significant cerebrovascular disorder, neurological disorder, intellectual deficiency, presence of a systemic disease known to impair cognition, general anaesthesia in the last six months and impairment of hand motricity. Written informed consent was provided by all participants before inclusion in the study.

## **Materials**

The simple RT task was administered using a MacIntosh PowerPC using PsyScope 1.0.1 software (Cohen, MacWhinney, Flatt, & Provost, 1993). The warning signal consisted of a 1000 Hz tone presented at 80-85 dB lasting for 250 ms. The imperative stimulus was a 4 cm diameter black circle presented centrally on a 35.56 cm (14-in.) screen. Responses were

provided on response buttons of the PsyScope ButtonBox, which enabled the precise measurement of both the IT and the ET. The 13 by 17 cm response box consisted of three horizontally arranged keys (red on the left, yellow in the middle and green on the right) between which there was a 3 cm space. The central button was used to start each trial.

### **Procedure**

Participants were instructed to use one single finger (usually the index finger) to perform the whole task. At the beginning of each trial, the word "Appuyez" ("press" in French) and a yellow square placed below it appeared at the center of a screen. This prompted participants to start the trial by pressing the home key (the yellow key) of the response box. The word and the square then disappeared from the screen and a warning signal, a sine wave tone of 1000 Hz presented at 80 to 85 dB for 250 ms, was presented. This tone served a double function: in addition to marking the exact moment of the beginning of the trial and PI, it indicated that the middle button had been pressed properly. To enable measurement of IT, it was important for participants to hold this button down until the response stimulus appeared on the screen. Thus, whenever the participants released the middle button before the imperative signal, a buzz was generated by the computer and the trial was counted as an error. During the preparatory interval (PI), participants were asked to stare at a black cross that was presented centrally on the screen. When the response stimulus occurred (a black circle), participants provided their responses by leaving the home key and pushing down, as quickly as possible, the green button located on the right portion of the response box. This action made the imperative stimulus disappear. After a 1000 ms interstimuli interval, the word "Appuyez" and the yellow square reappeared to indicate that the next trial could be started.

The design manipulated the temporal window within which the stimulus could occur (short vs. long temporal windows) along with the absolute PI duration (1, 3 and 5 s for the short temporal window and 5, 7 and 9 s for the long temporal window). Long and short temporal windows were presented in different blocks. Within each block, the order of presentation of the three different PIs varied randomly, but each of the three PIs occurred the same number of times (20 times each, for a total of 60 trials per block). Note that participants were unaware of the PI duration while completing the task. Manipulation of PI duration within each temporal window was meant to determine the impact of the probability of stimulus occurrence on RT. Manipulation of the temporal window allowed us to examine the capacity to develop preparation rapidly (in the short temporal window) and the capacity to maintain preparation over a certain time period (in the short and long temporal window). Finally, the interaction between temporal window and PI duration allowed us to examine the specific impact of the probability of stimulus occurrence as opposed to the ability to prepare rapidly for an upcoming response. None of these have been studied before.

Participants first performed five practice trials in the short temporal window condition and care was taken to ensure that patients were able to perform the task without anticipation errors prior to starting the experimental block. They then completed 60 trials in one of the two temporal windows. After about a 15-minute break, they completed the 60 trials of the other temporal window. The order of presentation of the two temporal windows was counterbalanced across participants.

In order to dissociate the cognitive (or attentional) from the motor processes involved in global RT, separate analyses were conducted on the initiation time (IT) data and execution time (ET) data. Such a distinction provides valuable information about temporal preparatory processes since these processes are thought to reflect cognitive operations related to the anticipation of the imperative stimulus (Henderson & Dittrich, 1998). Moreover, it has been shown with different populations that temporal preparation impacts IT to a much greater degree than ET (e.g. Bherer & Belleville, 2004a, 2004b; Jahanshahi et al., 1992). IT corresponded to the time between the occurrence of the imperative stimulus and the release of the home key, and ET corresponded to the time between the release of the home key and the pressing of the response button. Data were excluded if they were more than two standard deviations away from the mean. When Mauchly's test of sphericity reached a significant level for repeated measures, an effect was reported as significant according to the alpha level adjusted with the Huynh-Feldt correction. As mentioned above, generalized slowing can often account for at least some of the performance differences between HC and AD patients. Thus, analyses were performed on the log-transformed mean IT and ET. Log-transformation is commonly used in aging studies to control for generalized slowing, as a way to get round the scaling problem associated with the use of RT measures with groups that differ as to their baseline RT. Indeed, as Madden (2001) points out, a higher baseline RT typically leads to increased task condition effects. Logarithmic transformation of RT data enables to consider equal ratios as equal intervals, thereby correcting for the potential bias introduced by AD-related generalized slowing in the present study.

Data were analyzed using a mixed ANOVA with the temporal window (two levels) and the PI duration (three levels) as within subject factors and group (three levels) as between subject factor. To control for age-related differences between groups, an ANCOVA was also performed using age as covariate. Interactions involving the age factor were considered significant if they remained significant in the ANCOVA.

## Results

One MCI participant and one AD patient did not complete the short temporal window condition. For these two participants, replacement of missing data was based on the averaged IT and ET of the reference group (Tabachnik & Fidell, 2007).

### Log-transformed initiation times

Mean log-transformed IT for each group is illustrated in Figure 1. Results of the mixed ANOVA indicated a main PI duration effect,  $F(2,116) = 80.752, p < .001, \eta^2 = .58$ , as well as a main group effect,  $F(2,58) = 4.412, p < .05, \eta^2 = .13$ . A significant group X temporal window X PI duration interaction was also observed,  $F(4,116) = 3.252, p < .05, \eta^2 = .1$  ( $p = 0.05$  after controlling for age with the ANCOVA).

To further explore this interaction, analyses were performed separately for the short and long temporal windows. The Group X PI interaction was significant in the short temporal window,  $F(4,116) = 3.226, p < .05, \eta^2 = .10$ , but not in the long temporal window,  $F(4,120) < 1, ns$ . In the short temporal window, repeated contrasts performed separately for each of the three groups showed significant IT decrease from the first to the second PI in AD [ $F(1,13) =$

18.067,  $p = .001$ ,  $\eta^2 = .58$ ], MCI [ $F(1,18) = 67.857$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .79$ ] and HC [ $F(1,27) = 25.044$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .48$ ], with a steeper slope in the AD and MCI compared to HC. Repeated contrasts between the second and the third PI showed further decrease in IT in the HC group [ $F(1,27) = 4.999$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .16$ ], however IT increased in the MCI group [ $F(1,18) = 4.668$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .21$ ] and did not change in the AD group [ $F(1,13) = 0.201$ , *ns*].

### **Execution times**

Mean log-transformed ETs for each group are shown in Table 1. There was no Group x PI interaction on log-transformed ETs,  $F(4,116) = .471$ , *ns*. A main group effect was observed,  $F(2,58) = 11.403$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .28$ , AD patients being significantly slower than the two other groups, which were equivalent. A main PI duration effect was also found,  $F(2,116) = 22.177$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .28$ , as participants were significantly faster for the first to the second PI,  $F(1,58) = 36.102$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .38$ , while ET did not differ between the second and the third PI,  $F(1,58) = 0.712$ , *ns*.

### **Anticipation errors**

Anticipation errors occurred when participants released the home key before the imperative stimulus occurrence. Since most participants made no or very few anticipation errors, non-parametric analyses were used to compare the mean total number of errors for each group. The Kruskal-Wallis test revealed a significant difference among groups. Post-hoc analyses then revealed that the total number of errors was significantly larger for AD patients ( $M = 9.47$ ,  $SD = 6.63$ ) than for MCI patients ( $M = 3.68$ ,  $SD = 3.77$ ) and HCs ( $M = 2.71$ ,  $SD = 3.08$ ), whereas the latter two groups were equivalent.

## Discussion

In this study, AD and MCI patients were compared to healthy older adults in a simple RT task designed to assess the effect of non-specific or temporal preparation. Variable preparatory intervals were used with long and short temporal windows in order to assess participants' ability to initiate and maintain an adequate preparatory state and respond as fast as possible when required. The use of a variable PI design yielded a typical RT-PI function. Indeed, in all three groups, mean initiation time was longer at the first PI than at the second and third ones. A preparatory effect was found in both the short and long temporal windows, suggesting that all three groups were able to use probability of stimulus occurrence in order to modulate their level of preparation. However, group differences emerged in the PI-RT functions, suggesting response preparation deficits in AD and MCI.

While all groups showed sensitivity to the PI duration, differences emerged among groups in the slope of the IT-PI function, and this pattern was found within the short temporal window only. Indeed, in this temporal window, AD and MCI patients showed a steeper log-transformed IT decline from the first to the second PI duration compared to HCs. This observation suggests that AD and MCI patients had difficulty preparing a response within a short 1-second delay. Moreover, the results showed a different pattern of change between the second to the third PI of the short window. Whereas in the HC group, IT continued to decrease with increasing PI up to 5 seconds, IT increased in MCI and remained unchanged in AD patients.



One could identify at least three possible causes for the steeper IT decline observed in AD and MCI in the short temporal window from the first to the second PI. First, because stimuli occurring at the shortest PI are also those with the lowest probability of occurrence, one could argue that patients have difficulty preparing for stimuli that have a low probability of occurrence, as was found to be the case in healthy aging (Bherer & Belleville, 2004a). However, this hypothesis can be ruled out considering that patients were able to prepare adequately for the shortest PI duration of the long temporal window. Second, it is conceivable that patients actually have difficulty maintaining a state of preparation over a long period and, thus, choose to delay their preparation later over the PI duration. Again, however, this explanation cannot account for the absence of preparation deficit in the long temporal window, which indicates that patients were able to prepare adequately even with relatively long temporal intervals of up to nine seconds.

The third possible cause is the one that seems to explain our results. It is conceivable that AD and MCI patients have difficulty preparing for rapidly occurring events. Indeed, they are unable to reach an optimal state of preparation only for the shortest PI duration of the short temporal window. It is important to point out that a 1-second preparatory interval is still comfortably beyond the period for which AD and MCI can process items because their mean IT is much shorter even for unprepared responses (629 ms +/- 295 ms in AD; and 445 +/- 127 in MCI). However, because preparation is attention demanding, it might require some time to reach an optimal level. Interestingly, and although MCI patients tend to respond faster than AD patients, both groups show the same pattern of preparatory effects, as they both have difficulty preparing for rapidly occurring events compared to HCs. These results suggest that

preparation processes might be impaired quite early in the evolution of AD, though to a milder degree as discussed later.

One may argue that the deficit found in the present study is simply a consequence of the generalized slowing observed in AD (Nebes & Madden, 1988) and MCI (Gorus, De Raedt, Lambert, Lemper & Mets, 2008) or a scaling effect. Though this interpretation cannot be entirely discarded, it is important to point out that we have analyzed log-transformed RT to ensure that the interaction was not due to a mere general slowing effect. Because an interaction was found even with log-transformed RTs, it is unlikely that the effect is merely due to a simple scaling effect or a generalized slowing effect. Surprisingly, MCI patients did seem to respond faster than HCs. The source of this difference is unclear, however it might come from the slight age difference between the two groups. Note however that neither the age difference nor the difference in log-transformed IT between the two groups was significant, in spite of a difference in the preparatory function between the MCI patients and HCs.

The results of the present study provide clear evidence for a preparatory deficit in AD patients. Indeed, the HC group had a faster IT at the third PI of the short temporal window compared to the second PI, indicating that they were able to maintain an optimal state of preparation up to 5 seconds in the short temporal window. This suggests that they even continued to increase their level of preparation up to the 5 second PI. In contrast, persons with AD patients were unable to increase their level of preparation under such circumstances. Such an effect was not found within the long temporal window. It is well known that the magnitude

of the preparatory effects is reduced in very long temporal windows due to poor temporal estimation for long time delays (Niemi & Näätänen, 1981). This might explain why preparatory deficits emerged only in the short temporal window in the present study.

In addition to their difficulty to prepare for rapidly occurring events and their inability to maintain preparation at the longest PI of the short temporal window, differences were also observed among groups in log-transformed ETs and error rates. AD patients took longer in general to execute their responses, which suggests a more important slowness of psychomotor speed in this group. Besides, ET generally increases from the first to the second PI independently of the temporal window. This slowing of execution time with PI increase is typically observed in variable PI designs (Niemi & Näätänen, 1981). Importantly, this pattern was observed in all three groups. As to errors, the greater number of anticipation errors made by AD patients might be a reflection of their impulsivity. Increased impulsivity being characteristic of AD (Rochat et al., 2008), it is possible that AD patients had difficulty waiting until the stimulus actually appeared on the screen before releasing the home key.

The pattern of impairment found in MCI is similar to that found in AD. Results show that MCI patients have a distinct PI-IT function compared to HCs, such that they have a steeper slope between the first two PIs and tend to lose preparation at the longest PI of the short temporal window. It is this particular PI-IT function that supports our contention of impaired preparation capacities in MCI. However, persons with MCI did not show an overall increase in response time and, in fact, showed a slight non-significant faster response than HCs overall. The lack of an IT difference between MCI and HCs is surprising and temperates

somewhat the conclusion of a preparation deficit that would be as marked in MCI as in AD. It might indeed reflect the fact that the preparation deficit in MCI is milder than that found in AD and does not yet have a visible impact on performance as measured with IT.

In conclusion, results from the present study suggest that AD patients are unable to prepare for rapidly occurring events and that this deficit is also present during the MCI phase, though perhaps to a milder degree. This indicates that tasks that do not allow sufficient time for preparation may jeopardize performance of AD and MCI patients even if the cognitive process intended to be measured is not impaired. In real life, failure to prepare rapidly might slow a person's reaction to critical events that occur in rapid sequence or abruptly, as is often the case in work or in fast driving situations. Indeed, temporal cues are sometimes useful to ensure the synchronization of a critical action in a complex situation. For instance, a yellow traffic light is intended to forewarn the driver that he or she will be required to stop shortly. An impairment to use this temporal information might slow the driver's reaction to such events and lead to important consequences for pedestrians or other drivers. Besides, results from the present study also suggest that MCI and AD patients have difficulty maintaining an optimal level of preparation based on the probability of stimulus occurrence within a short temporal window. These issues stress the importance of accounting for the potential contribution of preparation deficits when interpreting RT data collected in persons with brain damage.

## References

- American Psychiatric Association. (1994). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, 4th ed.* Washington, DC: APA.
- Belleville, S., Chertkow, H., & Gauthier, S. (2007). Working memory and control of attention in persons with Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *Neuropsychology, 21*(4), 458-469.
- Belleville, S., Bherer, L., Lepage, E., Chertkow, H., & Gauthier, S. (2008). Task switching capacities in persons with Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *Neuropsychologia, 46*(8), 2225-2233.
- Belleville, S., Rouleau, N., Van der Linden, M., & Collette, F. (2003). Effect of manipulation and irrelevant noise on working memory capacity of patients with Alzheimer's dementia. *Neuropsychology, 17*(1), 69-81.
- Benton, A.L., Hamsher, K.D., Varney, N.R., & Spreen, O. (1983) *Contributions to Neuropsychological Assessment Tests.* New York: Oxford University Press.
- Bherer, L., & Belleville, S. (2004a). Age-related differences in response preparation: The role of time uncertainty. *Journal of Gerontology: Psychological Science, 59B* (2), 66-74.
- Bherer, L., & Belleville, S. (2004b). The effect of training on preparatory attention in older adults: Evidence for the role of uncertainty in age-related preparatory deficits. *Aging Neuropsychology and Cognition, 11* (1), 37-50.
- Bherer, L., Belleville, S., & Gilbert, B. (2003). Temporal preparation strategy may inflate RT deficit in patients with Parkinson's disease. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, 25*(8), 1079-1089.
- Bradshaw, J.M., Saling, M., Anderson, V., Hopwood, M., & Brodtmann, A. (2006). Higher cortical deficits influence attentional processing in dementia with Lewy bodies, relative to patients with dementia of the Alzheimer's type and controls. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry, 77*, 1129-1135.
- Cerella, J. (1985). Information processing rates in the elderly. *Psychological Bulletin, 98* (1), 67-83.

- Cohen, J. D., MacWhinney, B., Flatt, M., & Provost, J. (1993). PsyScope: A new graphic interactive environment for designing psychology experiments. *Behavioral Research Methods, Instruments, and Computers*, 25, 257-271.
- 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 clinical. *Journal of Psychiatric Research*, 121, 189-198.
- Frith, C.D., & Done, J.D. (1986). Routes to action in reaction time tasks. *Psychological Research*, 48, 169-177.
- Gorus, E., De Raedt, R., Lambert, M., Lemper, J.C., & Mets, T. (2008). Reaction times and performance variability in normal aging, mild cognitive impairment, and Alzheimer's disease. *Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology*, 21(3), 204-218.
- Gorus, E., De Raedt, R., Lambert, M., Lemper, J.C., & Mets, T. (2006). Attentional processes discriminate between patients with mild Alzheimer's disease and cognitively healthy elderly. *International Psychogeriatrics*, 18 (3), 539-549.
- Hébert, R., Guilbault, J., Desrosiers, J., & Dubuc, N. (2001). The Functional Autonomy Measurement System (SMAF): A clinical-based instrument for measuring disabilities and handicaps in older people. *Geriatrics Today: Journal of the Canadian Geriatrics Society*, 4, 141-147.
- Henderson, L., & Dittrich, W.H. (1998). Preparing to react in the absence of time uncertainty: I. New perspectives on simple reaction time. *British Journal of Psychology*, 89, 531-554.
- Jahanshahi, M., Brown, R.G., & Marsden, C.D. (1992). Simple and choice reaction time and the use of advance information for motor preparation in Parkinson's disease. *Brain*, 115(2), 539-564.
- Lindholm, J.M., & Parkinson, S.R. (1983). An interpretation of age-related differences in letter-matching performance. *Perception and Psychophysics*, 33, 283-294.
- Madden, D. (2001). Speed and timing of behavioural processes. In J.E. Birren & K. Warren Schaie, *Handbook of the Psychology of Aging*, 5<sup>th</sup> edition. San Francisco, CA: Academic Press.
- Madden, D., Pierce, T., & Allen, P. (1992). Adult age differences in attentional allocation during memory search. *Psychology and Aging*, 7 (4), 594-601.

- Mattis, S. (1976). Mental status examination for organic mental syndrome in the elderly patient. In R. Bellak & T.B. Karasu (Eds). *Geriatric psychiatry* (pp. 77-121). New York: Grune & Stratton.
- McKhann, G., Drachman, D., Folstein, M., Katzman, R., Proce, D., & Stadlan E.M. (1984). Clinical diagnosis of Alzheimer's disease: Report of the NINCDS-ADRDA work group under the auspices of Health and Human Services Task Force on Alzheimer's Disease. *Neurology*, *34*, 939-944.
- Meyers, J., & Meyers, K. (1995). *The Meyers Scoring System for the Rey Complex Figure and the Recognition Trial: Professional manual*. Odessa, Fla: Psychological Assessment Resources.
- Nebes, R.D., & Brady, C.B. (1992). Generalized cognitive slowing and severity of dementia in Alzheimer's disease: Implications for the interpretation of response-time data. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *14* (2), 317-326.
- Nebes, R.D., & Brady, C.B. (1993). Phasic and tonic alertness in Alzheimer's disease. *Cortex*, *29*, 77-90.
- Nebes, R.D., & Madden, D.J. (1988). Different patterns of cognitive slowing produced by Alzheimer's disease and normal aging. *Psychology and Aging*, *3* (1), 102-104.
- Niemi, P. (1979). Stimulus intensity effects on auditory and visual reaction processes. *Acta Psychologica*, *43*, 299-312.
- Niemi, P., & Näätänen, R. (1981). Foreperiod and simple reaction time. *Psychological Bulletin*, *89* (1), 133-162.
- Perry, R.J., & Hodges, J.R. (1999). Attention and executive deficits in Alzheimer's disease: a critical review. *Brain*, *122*, 383-404.
- Petersen, R.C., Doody, R., Kurz, A., Mohs, R.C., Morris, J.C., Rabins, P.V., et al. (2001). Current concepts in mild cognitive impairment. *Archives of Neurology*, *58*, 1985-1992.
- Pirozzolo, F., Christensen, K., Ogle, K., Hansch, E., & Thompson, W. (1981). Simple and choice reaction time in dementia: clinical implications. *Neurobiology of Aging*, *2*(2), 113-117.

- Rapp, M.A., & Reischies, F.M. (2005). Attention and executive control predict Alzheimer's disease in late life: Results from the Berlin Aging Study (BASE). *American Journal of Geriatric Psychiatry, 13* (2), 134-141.
- Regard, M. (1981). *Cognitive rigidity and flexibility: a neuropsychological study*. Unpublished PhD dissertation, University of Victoria, British Columbia.
- Rochat, L., Delbeuck, X., Billieux, J., D'Acromont, M., Van der Linden, A.C., & Van der Linden, M. (2008). Assessing impulsivity changes in Alzheimer disease. *Alzheimer Disease and Associated Disorders, 22*(3), 278-283.
- Salthouse, T.A. (1985). Speed of behaviour and its implications for cognition. In J.E. Birren & K.W. Schaie (Eds.), *Handbook of the psychology of aging, 2<sup>nd</sup> edition*. Collection: The Handbooks of Aging. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Salthouse, T.A. (1996). The processing-speed theory of adult-age differences in cognition. *Psychological Review, 103* (3), 403-428.
- Salthouse, T.A., & Hedden, T. (2002). Interpreting reaction time measures in between-group comparisons. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, 24* (7), 858-872.
- Signoret, J.L. (1991). *Batterie d'efficience mnésique: BEM 144*. Paris: Elsevier.
- Storandt, M., & Beaudreau, S. (2004). Do reaction time measures enhance diagnosis of early-stage dementia of the Alzheimer type. *Archives of Clinical Neuropsychology, 19*, 119-124.
- Stuss, D.T., Alexander, M.P., Shallice, T., Picton, T.W., Binns, M.A., Macdonald, R., Borowiec, A., & Katz, D.I. (2005). Multiple frontal systems controlling response speed. *Neuropsychologia, 43*, 396-417.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2007). *Using Multivariate Statistics, 5th ed.* Boston: Allyn and Bacon.
- Vallesi, A., Shallice, T., & Walsh, V. (2007). Role of the prefrontal cortex in the foreperiod effect: TMS evidence for dual mechanisms in temporal preparation. *Cerebral Cortex, 17*, 466-474.
- Van der Linden, M., Coyette, F., Poitrenaud, J., & Gremem, M.O.T. (2004). L'épreuve de rappel libre/rappel indicé à 16 items (RL/RI 16). In M. Van der Linden, S. Adam, A. Agniel & M.O.T. Gremem (Eds.), *L'Évaluation des Troubles de la Mémoire:*



*Présentation de Quatre Tests de Mémoire Épisodique (avec leur Étalonnage)*, pp. 25-47.  
Marseille: Solal.

Wechsler, D. (1997). *Administration and scoring manual: Wechsler Adult Intelligence Scale, Third Edition*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.

Wenger, M.J., & Townsend, J.T. (2000). Basic response time tools for studying general processing capacity in attention, perception, and cognition. *Journal of General Psychology*, 127 (1), 67-99.

## **Acknowledgments**

This study was supported by a CHIR grant to SB. SSR was supported by a scholarship from Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC). SB was supported by a chercheur-national grant from the Fond de la Recherche en Santé du Québec (FRSQ) and LB was supported by a chercheur junior-2 grant from FRSQ. We would like to thank Dr Serge Gauthier and the Clinique Cognition of the Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal (director: Dr Marie-Jeanne Kergoat) for referring some of the patients, Emilie Lepage for the neuropsychological testing, the neuropsychology service for support in clinical data interpretation and Harold Gaboury for editorial assistance.

Table 1

*Group means for demographic characteristics and performance on neuropsychological measures.*

	AD	MCI	HC
Sample size	15	20	28
Women/Men	8/7	13/7	23/5
Age (years)	73.9 (7.8)	64.4 (11.5)	67.5 (11.1)
Education (years)	10.7 (4.4)	14.0 (4.7)	13.3 (3.8)
MDRS	120.5 (12.7)**	136.9 (4.8)	140.8 (2.6)
MMSE	24.5 (3.8)**	28.0 (2.1)	28.9 (1.0)
Digit-symbol coding	6.3 (2.4)**	9.7 (3.1)	9.7 (2.4)
JLO	20.5 (5.2)*	23.0 (5.1)	24.3 (3.1)
BEM immediate	2.2 (1.6)**	6.7 (2.4)**	9.2 (1.5)
BEM delayed	1.4 (1.6)**	6.3 (3.0)**	9.1 (1.5)
Hachinski scale	2.1 (1.2)	2.9 (2.4)	1.8 (1.3)
SMAF	-7.2 (7.3)**	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
RCFT	26.4 (4.7)**	30.3 (3.7)	31.7 (2.7)
Stroop color time (s)	68.5 (42.6)**	30.8 (9.4)	30.4 (9.7)
Stroop color errors	4.6 (4.0)**	2.1 (2.5)	1.1 (1.2)
FR/CR delayed recall	6.6 (4.7)**	14.7 (2.4)	15.9 (0.3)
GDS 15	2.0 (2.0)	4.0 (3.1)**	1.9 (2.6)

\* Different from the HCs ( $p < .05$ ); \*\* Different from the HCs ( $p < .01$ ); MDRS = Mattis Dementia Rating Scale; MMSE = Mini Mental State Examination; JLO = Judgement of Line Orientation; BEM immediate = Batterie d'Efficiency Mnésique, immediate story recall; BEM delayed = Batterie d'Efficiency Mnésique, delayed story recall; SMAF = Functional Autonomy Measurement System; RCFT = Rey Complex Figure Test, total points for the copy; FR/CR = Free recall / cued recall; GDS 15 = Geriatric Depression Scale, 15-item version

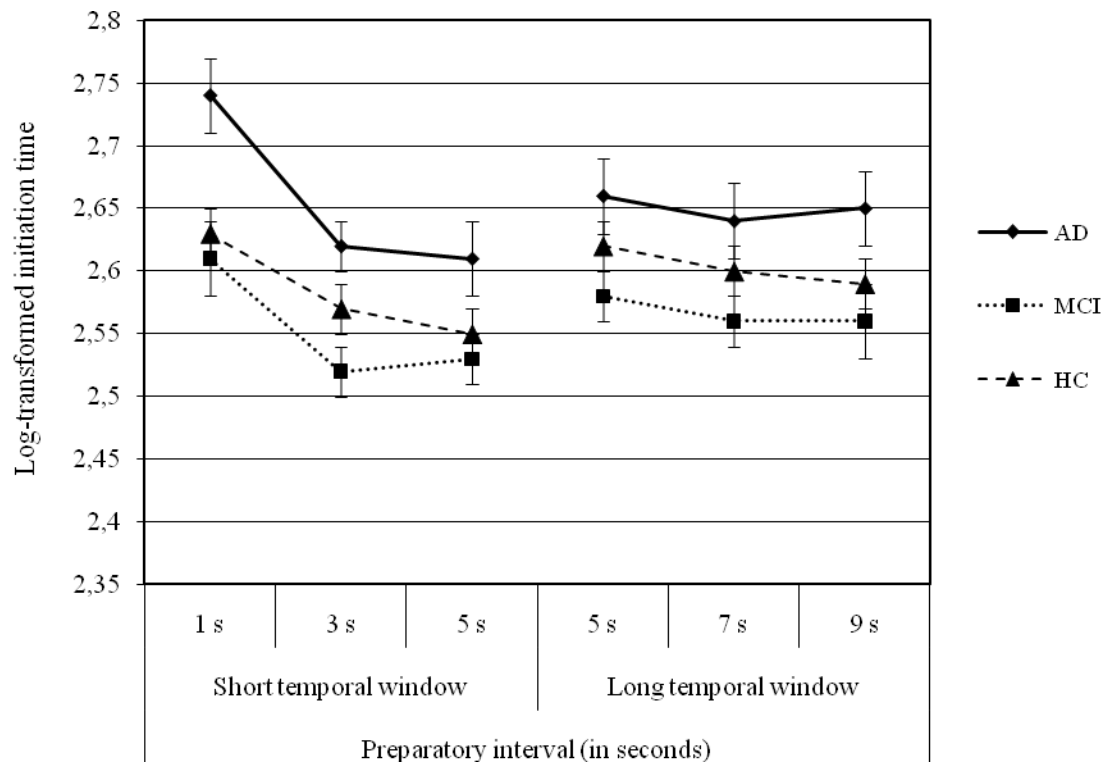
Table 2

*Mean log-transformed execution times (in ms) for each group (standard deviations are shown in parenthesis).*

Group	Short temporal window			Long temporal window		
	PI1 (1s)	PI2 (3s)	PI3 (5s)	PI1 (5s)	PI2 (7s)	PI3 (9s)
AD	2,44 (0,17)	2,50 (0,17)	2,50 (0,19)	2,47 (0,17)	2,51 (0,16)	2,49 (0,20)
MCI	2,11 (0,18)	2,19 (0,18)	2,18 (0,21)	2,22 (0,17)	2,21 (0,17)	2,23 (0,20)
HC	2,23 (0,18)	2,27 (0,17)	2,27 (0,18)	2,32 (0,21)	2,35 (0,19)	2,34 (0,21)

Figure 1

*Mean log-transformed initiation times as a function of PIs in the long and short temporal windows for AD, MCI and HC participants.*



## **ANNEXE II**

### **Chapitre 1**

### **Apport de chaque coauteur**

**Sylvie Belleville** a rédigé l'introduction et la conclusion, en plus d'être impliquée dans chacune des étapes mentionnées ci-dessous.

**Stéphanie Sylvain-Roy** a rédigé les sections « Working memory in MCI » et « Natural history of MCI », et participé à la revue de littérature concernant ces sections. Elle a également fait la mise en forme du chapitre et révisé l'ensemble du manuscrit.

**Chloé de Boysson** a rédigé la section « Episodic memory in MCI », et participé à la revue de littérature concernant cette section.

**Marie-Claude Ménard** a participé à la revue de littérature pour l'ensemble des sections de ce chapitre.

## **Chapter 23: Characterizing the memory changes in persons with mild cognitive impairment**

Sylvie Belleville, Stéphanie Sylvain-Roy, Chloé de Boysson and Marie-Claude Ménéard

Publié en 2008 dans W. S. Sossin, J.-C. Lacaille, V. F. Castellucci, & S. Belleville (Eds.),  
*Progress in Brain Research*, 169, 365-375.



## **Abstract**

Persons with mild cognitive impairment do not meet criteria for Alzheimer's disease but are at high risk for developing the disease. Presence of a memory deficit is a key component in the characterization of mild cognitive impairment. This chapter presents empirical studies that attempt to describe and understand the nature of the memory deficit in mild cognitive impairment with a focus on episodic memory and working memory. Cross-sectional studies report prominent deficits of episodic memory characterized by impaired encoding of the contextual information that makes up complex events. This results in reduced free and cued recall, impaired recognition and impaired associative learning. Although semantic encoding is found to be impaired in conditions that rely on explicit and intentional retrieval, preserved semantic processing is found with automatic conditions of testing. Studies indicate the presence of a partial deficit of working memory with the ability to divide attention being most severely impaired. However, there appears to be heterogeneity as to the extent of the working memory impairment. The presence of vascular anomalies on MRI, as well as being in a more advanced stage in the continuum from mild cognitive impairment to Alzheimer's disease, are associated with more severe and more pervasive working memory deficits. Finally, longitudinal studies indicate that the combination of episodic and working memory deficits represents a strong predictor of progression from mild cognitive impairment to Alzheimer's disease.

## **Introduction**

Age-associated neurodegenerative disorders have made an enormous contribution to the scientific investigation of the nature of memory processes and their underlying brain organization. This is due, in large part, to the fact that those are diseases that strike the brain structures responsible for memory processes. As a result, they cause marked as well as selective memory deficits. Memory studies have thus investigated the way these diseases dissect memory processes. Indeed, dissociations amongst memory processes or systems in neurodegenerative diseases have largely contributed to the development of memory models. The study of Alzheimer's disease (AD) has been key in this endeavor. Presence of a memory deficit is indeed central to the diagnosis of AD and represents the main complaint from affected persons. In addition, the medial temporal lobe – typically implicated in episodic memory – is one of the brain structures that is most affected in the earliest phase of AD. A large number of studies have thus attempted to describe and characterize memory processes in AD. This has led to comprehensive descriptions of impaired and preserved memory processes in AD (for reviews, see Becker and Overman, 2002; Morris and Becker, 2004; Ergis et al., 2005). While this area of research has led to significant contributions in recent years, there has been a major shift of interest toward the earliest phase of the disease.

AD is a progressive disorder and studies have shown that the first signs of the disease can actually precede by many years the time at which patients actually meet criteria for diagnosis (Elias et al., 2000; See Figure 1 for a representation of changes in healthy aging and AD). In recent years, there has been tremendous interest in this very early phase of AD, for which the term mild cognitive impairment (MCI) has been proposed (See Gauthier et al., 2006

for a review). Typically, persons with MCI have a memory complaint and show objective deficits on formal tests of memory, but they don't meet criteria for dementia. They have neither global cognitive impairment, nor functional impact on activities of daily life (Petersen et al., 1999; Petersen, 2003). Yet older persons have a ten-fold increase in their risk of developing AD when they meet criteria for MCI. For this reason, it is now generally agreed that a large proportion of persons with MCI are in the process of developing AD.

The goal of this chapter is to present the current state of knowledge regarding memory functions in MCI. Investigating memory in MCI is justified on numerous grounds. First, persons with MCI have marked atrophy of the hippocampus (Jack et al., 1999). MCI thus represents an ideal model for the study of hippocampal-related memory. Second, the cognitive impairment in AD is pervasive, which is likely to impact profoundly on the performance that those patients are able to maintain on memory tasks. In contrast, persons with MCI don't show a global cognitive impairment, which permits assessment of memory deficits without the detrimental contribution of global cognitive deficits. Finally, it is critical to understand how the memory deficits of persons with MCI compare with those of persons with AD, to determine whether they differ in a qualitative or quantitative manner. If MCI results in an impairment that strikes different memory processes than AD, this would confirm the presence of qualitative differences among the two clinical groups. In turn, if MCI causes impairment to the same processes as is typical of AD, but to a lesser degree, this would confirm quantitative differences. Resolving this issue is highly relevant to clinicians. It is also of importance to those involved in elucidating the natural history of AD along its continuum from MCI to dementia. Third, it is of prime interest for memory researchers. To investigate the pattern of

memory breakdown during a degenerative process provides exciting information at the neurobiological level, as some areas become increasingly dysfunctional during the process, while others, undamaged at first, get involved during the evolution of the disease. Finally, the study of memory changes during the MCI phase provides cognitive data that complement those made available by studies of static brain lesions. Indeed, the particular dynamic of impairment with accumulation of lesions can provide a rich set of information for theorizing, as it should constrain current theoretical models of memory organization. It also sheds light on the manner in which the older brain compensates for slowly occurring lesions.

### **Episodic memory in mild cognitive impairment (MCI)**

Because episodic memory is impaired early in the evolution of AD, it is the cognitive component that has been the most studied in MCI. Episodic memory refers to encoding and retrieval of events embedded in their spatio-temporal context. Studies of MCI have shown an episodic memory deficit in MCI when tested for lists of words, short texts, as well as visuo-spatial material (Petersen et al., 1997; 1999; Kawas et al., 2003; Loewenstein et al., 2004; Moulin et al., 2004; Della Sala et al., 2005; Ivanoiu et al., 2005). Typically, the performance of individuals with MCI is about 1.5 to 2 standard deviations under that of matched controls. The level of performance stands between that of healthy older adults and AD patients (Petersen et al., 1999), although some studies have reported that impairment can be as profound as that found in AD on some task components. Recent studies have attempted to identify the mechanisms that contribute to the episodic memory deficit found in MCI.

Typically, this is done by manipulating encoding and retrieval conditions to identify the impaired mechanism underlying performance decline.

Most studies have reported impairment using both free recall and cued recall conditions (Petersen et al., 1999; Ivanoiu et al., 2005). In one of these studies, impairment was reported with a cued recall task that presented a large number of items in order to increase task sensitivity (Ivanoiu et al., 2005; Adam et al., 2007). The test involved learning 48 words under a condition that oriented encoding toward the categorical properties of items (for example, to encode the visually presented word “palm”, the examiner would ask “ show me the tree”). This was followed by categorical cued recall (for example, the examiner would ask to recall the word that was a tree). The test showed a good discriminating validity to distinguish healthy older adults from persons with MCI (Adam et al., 2007). One of the studies compared the cued recall test with measures of free recall and of visual recognition memory (Ivanoiu et al., 2005). The cued recall test was as sensitive and specific to AD and MCI as delayed free recall tasks, but cued recall was better at classifying participants as a function of their diagnosis.

Impaired cued recall can be interpreted as arising from greater difficulties in MCI than in healthy aging to benefit from rich cues at encoding and retrieval. Thus, tests promoting deep encoding as well as providing cues at recall may be particularly useful in a perspective of early diagnosis of AD. Similar results have been found in our laboratory (Hudon et al., 2006). We used the Cued recall task from the Memoria battery (Belleville et al., 2002). Two conditions of free recall are compared in this task: one that promotes categorical encoding by asking the patients to point and memorize items that belong to particular semantic categories,

and one where no orientation is provided during encoding. Persons with MCI were comparable to healthy older adults when tested under the no-orientation condition. In contrast, they were markedly impaired under the condition that orients them toward the semantic properties of words. This was due to the fact that categorical orienting improved performance, probably by promoting a better encoding, in healthy controls but not in persons with MCI. These findings suggest that persons with MCI have a marked deficit in encoding material even when they are provided with strong supportive cues.

Support for an encoding deficit is also provided by studies reporting impaired recognition. Dudas and colleagues (2005) reported that the face recognition level of persons with MCI was as low as that of persons suffering from AD. Once scores were corrected for the participants' response bias ( $d'$ ), persons with MCI showed better face recognition than persons with AD, but their scores were still below those of controls. Regarding recognition of verbal material, some studies have reported normal performance (ex: Hudon et al., 2006), while others report the presence of a deficit (ex: Perri et al., 2005; Bennett et al., 2006). Bennett and colleagues (2006) compared MCI persons with healthy older adults using verbal free recall, Yes/No verbal recognition and three-alternative forced-choice verbal recognition. Persons with MCI showed deficits on all tasks, but the Yes/No recognition was the best to predict the group to which participants belonged.

The deficits observed in cued recall and in recognition suggest that persons with MCI have difficulty in efficiently encoding information during the learning phase, a pattern that is also characteristic of AD (see Lekeu & Van der Linden, 2005, for a review). Some studies

evaluated the processes that take place during the memory encoding process. Recently, Hudon and colleagues (2006) evaluated persons with MCI to see if they encoded the general or schematic properties of information (the gist) to the same extent as healthy older adults. This was assessed with a text memory task that distinguishes recall of the main ideas from the secondary ideas of a text (Memo-text; Cadilhac et al., 1997). Importantly, the task used here was constructed by relying on a theoretical model of discourse processing (Kintsch & Van Dijk, 1978) and was not overloaded by detail information; on the contrary, there was a balance between general and detail items. Results indicated that both healthy older adults and persons with MCI recall more items related to main ideas (gist) than detail items. Importantly, MCI were impaired for the two types of items to the same degree and main ideas were thus not selectively preserved. Thus, even if memory for gist was not preserved in MCI, those patients were sensitive to the hierarchical structure of a text since they reported more general ideas than secondary ones, as is typically found in normal participants. Persons with MCI differed quantitatively from AD patients on this task but they did not differ qualitatively. Persons with AD were more impaired than persons with MCI and this was true for all item types. Furthermore, like MCI persons and healthy controls, AD patients recalled more gist than detail items from the story. Thus, both persons with AD and individuals with MCI appear able to process the general semantic or schematic dimensions of material but are unable to use this information to support their episodic memory. This is coherent with our findings that persons with AD and MCI cannot make use of semantic orientation to improve their recall. Similarly, Perri and collaborators (2005) have reported reduced semantic clustering when patients were asked to recall a list of categorically related words, supporting the finding that MCI persons fail to use semantic knowledge to support encoding and/or retrieval.

In line with this hypothesis, we showed that MCI persons are sensitive to the overall semantic context of a list in the Deese-Roediger-McDermot (DRM) false recognition paradigm. In this paradigm, participants first learn a series of words that are all associated to a non-presented critical lure. In the retrieval phase, participants are shown studied items, the non-studied critical lure and unrelated non-studied items. Typically, healthy adults falsely recognize the critical lure because the semantic context of the list provides the gist upon which participants base their recognition. When taking into account their tendency for false alarms by subtracting the level of false alarms to unrelated items, AD patients exhibit lower level of false recognition for the critical lure than healthy controls (Hudon et al., 2006). This indicates that AD impairs the ability to process and memorize the general semantic context of the list. In contrast, persons with MCI have a level of false recognition for the lure comparable to that of healthy controls. They are thus influenced by the general semantic context of lists and are able to encode the gist of the list. The combination of our results on text memory and on the DRM paradigms suggests that the nature of the task modulates the capacity of individuals with MCI to encode the general ideas (gist) of events and/or impacts on their influence on performance. Persons with MCI are sensitive to the semantic or schematic properties of the to-be learned material. However, this is insufficient for normalizing their performance in tasks that measure episodic memory.

This is perhaps due to their inability to perform contextual binding between the to-be remembered items and the properties that form the learning episode. Indeed, many studies have reported deficits in associative memory, which is the ability to associate previously unrelated items presented together during the encoding phase, or to associate one item to its



spatial or visual context (Collie et al., 2002; Dudas et al., 2005; Nordahl et al., 2005). Similarly, Loewenstein and collaborators (2004) reported a deficit in source memory, as measured by indicating the list to which the items belonged. Those data are supportive of problems in encoding items with their context, a deficit that was related to hippocampal dysfunctions (Collie et al., 2002).

Likewise, studies evaluating the impact of interference revealed a sensitivity to both proactive (Loewenstein et al., 2004) and retroactive interference (Loewenstein et al., 2004; Della Sala et al., 2005). In the Loewenstein et al.'s study (2004) participants first learned 10 common objects. They were then asked to learn 10 new objects that were semantically related to the first objects (to measure proactive interference), followed by a recall of the objects from the first series (to measure retroactive interference). Persons with AD and persons with MCI showed greater proactive and retroactive interference than healthy controls. Whereas proactive interference was greater in AD than in MCI, retroactive interference effects were as great in MCI as they were in AD. This sensitivity to interference suggests a difficulty in efficiently encoding the temporal context in which items were presented. This observation is coherent with an encoding problem that would arise from a difficulty in binding items with their contextual elements.

Delay effects and forgetting rate were examined to evaluate storage capacity in persons with MCI. Most studies have reported impairment in both immediate and delayed recall (Masur et al., 1990; Petersen et al., 1999; Ivanoiu et al., 2005; Perri et al, 2005; Hudon et al., 2006), but some failed to report impairment when testing is immediate (Della Sala et al.,

2005). In contrast, delayed recall was systematically impaired (Loewenstein et al., 2004; Della Sala et al., 2005; Ivanoiu et al., 2005) and a few studies obtained greater impairment with delayed recall (ex: Maruff et al. 2004; Perri et al, 2005). Furthermore, Moulin et al. (2004) observed rapid forgetting in persons with MCI. Those two findings - delayed recall impairment and rapid forgetting - are compatible with a deficit in information storage. Contrary to the study by Moulin and collaborators, Grober and Kawas (1997) did not find an accelerated forgetting in the pre-clinical phase of AD. These divergent results could be related to methodological components of the two studies. First, Grober and Kawas used an epidemiological sample, and participants were retrospectively identified as having been, three years prior, in a pre-clinical phase of AD. Thus, it is unclear whether those patients actually met criteria for MCI when the measure of their forgetting rate was taken. In contrast, Moulin and colleagues recruited their participants from a memory clinic and used the classical criteria for MCI. Participants recruited from a clinical sample may represent a more homogeneous group of MCI or could have a greater impairment (Petersen, 2003).

One last aspect that should be addressed is the effect of material type on the memory capacity of persons with MCI. Typically, AD patients show deficits that cover a wide range of material. Thus, memory for verbal and non-verbal material is impaired in AD. However, the pervasive effect of memory deficits in MCI has been challenged. Indeed, some authors have proposed that non-verbal memory may be more vulnerable in persons with MCI. The findings with recognition procedures are coherent with this view. Recognition was found to be systematically impaired when it was tested with non-verbal material such as faces or visual patterns, whereas the pattern is more incoherent with verbal material. In a longitudinal follow-

up of persons with MCI, Ivanoiu and colleagues (2005) observed that those who would later progress to AD exhibited problems in both verbal and visual episodic memory five years prior to progression, whereas those who did not progress to AD showed deficits in the verbal domain only. This could be interpreted as arising from a specific impairment of the spatial domain. It could also be due to the fact that verbal recognition is most often tested with well-known material that can be supported by semantic encoding, which is not the case for most non-verbal tests. Finally, it could be related to the fact that encoding non-verbal material is more dependent on the initiation of controlled or demanding attentional strategies. This latter hypothesis is coherent with the presence of a partial impairment of the attentional component of working memory in persons with MCI, as will be shown below.

### **Working memory in MCI**

Working memory is an attentional control system involved in the online manipulation and maintenance of information. One of the most influent models of working memory, the Baddeley and Hitch model (1974), conceptualizes it as a tripartite system which includes a phonological loop, involved in the short-term maintenance of verbal material, a visuo-spatial sketch pad, involved in the maintenance of image-based and spatial information, and an attentional controller, the central executive. Working memory is among the most severely impaired cognitive functions in AD, even in the early stage of the disease (Belleville et al., 1996; 2003). Persons with AD have a reduced span capacity when using words and visuo-spatial sequences (for a review, see Belleville & Bélanger, 2006). They are also markedly impaired in more complex working memory tasks that involve concurrent retention and processing (Baddeley et al., 1986; 2001; Morris, 1986; Belleville et al., 1996; 2003).

Considering that working memory is sensitive to the earliest phase of AD, it is surprising that its direct evaluation in individuals with MCI has only been carried out in a few studies.

Using a psychometric approach, some studies showed results that are compatible with the presence of a working memory impairment in MCI. Difficulties on the Digit-symbol and Block design subtests of the Wechsler Adult Intelligence Scale (Flicker et al., 1991; Goldman et al., 1999) as well as on the Mental control subtest of the Wechsler Memory Scale (Tierney et al., 1996) have been reported. A difficulty in maintaining complex tasks subgoals within working memory could account for these impairments. However, these measures are neither pure nor classical indicators of working memory. For instance, many of these tests are timed, and impaired performance could be explained by psychomotor slowing. Indeed, studies have reported impaired performance on psychomotor tasks measuring capacities to perform complex motor tasks, speed tasks and tasks measuring fine manual dexterity in persons with MCI (Kluger et al., 1997; Levinoff et al., 2005; but see Goldman et al., 1999).

More recently, we directly assessed working memory in individuals with MCI and compared their performance with that of persons with AD (Belleville et al., in press). Our goal was to investigate whether different attentional control mechanisms within working memory were selectively impaired in individuals with MCI and, more precisely, whether certain components would be impaired while others remain functional in the MCI phase. Three working memory components were measured. An adapted version of the Brown-Peterson procedure was used to assess dual-tasking. The procedure, taken from the Memoria battery (Belleville et al., 2002), involves asking participants to recall three consonants after short delays (0-10-20-30 seconds) during which they perform an addition task. Manipulation

capacities were measured with the alphabetical recall procedure, where participants were asked to report a series of words in the order of the alphabet (Belleville et al., 1998). Semantic inhibition was measured with the Hayling paradigm, which involves completing sentences with an item that is unrelated to the actual semantic meaning of the sentence (Burgess & Shallice, 1996; 1997). These tasks were selected because they are tasks for which AD persons are known to be profoundly impaired (Belleville et al., 1996; 2003; 2006).

Three groups of participants were involved in the study: individuals with AD, persons with MCI and healthy older adults. AD patients were impaired on all tasks, confirming previously reported findings of a pervasive working memory deficit. On the contrary, persons with MCI showed selective impairment. First, their performance on the Hayling task was normal, even though this is a paradigm known to be highly sensitive to the early stage of AD. Thus, semantic inhibition was intact in MCI. In contrast, performance on the Brown-Peterson procedure was severely impaired. As was mentioned above, patients are asked in this procedure to maintain three consonants over short delays (0-10-20-30 seconds) while completing an addition task. Whereas, AD patients were severely impaired on all four delays, persons with MCI were only impaired with the longest one (30 seconds). Of clinical significance was the fact that impairment at the 30-second delay was as severe in persons with MCI as it was in AD. Finally, performance on alphabetic recall was inferior to that of normal elderly persons, but this effect was non significant, and there was great variability among individuals with MCI.

All MCI persons who participated in the Belleville et al. study were then tested yearly in a longitudinal follow-up to determine those who would later progress to AD. This allowed the researchers to identify retrospectively those individuals with MCI who would later deteriorate and assess whether that subgroup of decliners would exhibit more severe or widespread working memory deficit. It was found that the group of later decliners was significantly impaired on the alphabetical recall. Therefore, impairment in alphabetical recall could predict future progression of symptoms in MCI or reflect a more advanced stage in the MCI/AD continuum. Strikingly, MCI decliners did not have a more impaired performance than non-decliners on the Hayling test. Our failure to find an inhibition deficit on the Hayling test is surprising because this is a task that is severely impaired in early AD. This could be due to a lack of task sensitivity, a hypothesis that we are currently investigating. Furthermore, the Hayling test implicates semantic inhibition. It is possible that other types of inhibition are impaired in MCI. In line with this suggestion, Wylie et al. (2007) reported that persons with MCI have difficulty inhibiting an incongruent response in the Flanker task where participants are asked to indicate the direction of a target arrow flanked by distractor arrows pointing in the opposite direction.

Other studies have provided support for the presence of a working memory deficit in MCI. Alescio-Lautier et al. (2007) found no visual span deficit in persons with MCI. However, these persons were impaired when visual and visuospatial short-term recognition was delayed by a short interval (1 to 30 sec) filled with an interference task. Dannhausser et al. (2005) reported deficits in a divided attention paradigm that involved concurrent detection of letters and numbers presented in separate visual (letters) and auditory (digits) streams.

There have also been studies indicating that the presence of vascular anomalies in MCI may relate to the extent of their working memory deficits. Nordahl and collaborators (2005) distinguished two subgroups of individuals with MCI based on their neuroradiological characteristics as shown with MRI. One group was composed of those MCI with marked hippocampal atrophy, whereas the other group was composed of those MCI with significant subcortical white matter anomalies. The authors proposed that the former group corresponded to a prodrome of AD, while the latter would be a prodrome for sub-cortical vascular dementia. A set of clinical and cognitive tasks was then administered in order to compare the two groups. Results showed that both MCI groups had episodic memory impairment. However, working memory, as measured by the N-back, a task that reflects updating capacities, was only impaired in those MCI with vascular anomalies. Results from our laboratory are congruent with this finding (Labelle et al., 2007). We compared MCI persons with persons meeting criteria for the sub-cortical vascular form of MCI (Frisoni et al., 2002). The two groups were equally impaired on the Brown-Peterson procedure and none was impaired on alphabetical recall. However, the group of vascular MCI showed more severe impairment than healthy controls and MCI on the stop signal, a task that measures motor inhibition, and on the third plate of the Stroop test, a task that measures verbal inhibition.

### **Natural history of MCI**

According to some authors, only episodic memory is impaired during the early MCI phase, and this is followed by executive control deficits, and then by language and perception deficits (Perry & Hodges, 1999; Petersen, 2003). However, few studies have actually used longitudinal follow-up to assess the way in which cognitive impairments unravel during the

MCI period. One approach is to use longitudinal follow-up to identify cognitive predictors of later progression to dementia. Indeed, 10-20 % of persons meeting criteria for MCI at a particular time will not progress to dementia (Petersen, 2003), and some may even revert to normal levels (Ritchie, 2004). Longitudinal follow-up of individuals with MCI allows identification of cognitive variables that better predict future progression to AD. Such longitudinal studies have reported that impairment of both episodic memory and executive control are good predictors of progression toward dementia during the following years (Tierney et al., 1996; Petersen et al., 1997; Kluger et al., 1999; Chen et al., 2000). This suggests that impairment in those two domains occurs quite early in the progression from MCI to AD.

In a longitudinal study following a cohort of persons with MCI and a cohort of individuals with AD, Lambon Ralph et al. (2003) showed that the cognitive changes in MCI were relatively gradual, beginning with memory, and later extending to language and visuo-perceptual functions. They also reported that from the moment individuals with MCI convert to AD, their progression is similar to that of individuals with AD, supporting common neuropathological processes. Although distinct profiles could be identified during the MCI phase, a significant homogeneity was observed overall in the progression of the patients. Unfortunately, the progression of working memory or executive function was not investigated in this study and, for this reason, this study does not shed light on whether this component is impaired as early as the episodic memory component is.



Bennett and collaborators (2002) followed 211 individuals with MCI and 587 individuals with AD annually over a 6-year period. On the basis of an extended cognitive assessment, they derived composite scores for episodic memory, semantic memory, working memory, perceptual speed and visuo-spatial abilities. They reported impairment in each domain at the first evaluation, followed by a differential decline across domains. Persons with MCI showed a more rapid decline than healthy controls for episodic memory and semantic memory. They also showed a more rapid decline of working memory than healthy controls but this was only marginally significant.

To summarize, little is known regarding the rate and pattern of memory decline during the MCI period. The few studies available suggest a differential rate of decline across general cognitive domains. However, none of these studies have focused on fine components of memory.

### **Conclusion**

Studies of MCI can provide important information to further our understanding of memory processes and of their breakdown following brain damage. Indeed, persons with dementia have a global cognitive impairment, which renders difficult a fine characterization of cognitive functions. The selectivity in deficits expected to occur in persons with MCI has the potential to provide neuropsychological support to dissociate among memory processes.

This is the case in the domain of working memory, where three components, divided attention, inhibition and manipulation, known to be equally impaired in AD, exhibit selective

impairment in MCI. Divided attention is severely impaired, manipulation is only impaired in patients who are close to progression, whereas semantic inhibition is unimpaired. At a theoretical level, this pattern supports the hypothesis according to which those are independent working memory components that rely on neural substrates differently affected in the early phase of the disease. Similarly, persons with MCI are sensitive to the semantic context of a list in the false recognition paradigm, which contrasts with AD patients who show reduced encoding of semantic properties whether tested directly or indirectly.

In addition, studies of MCI allow a better approach to the natural history of the MCI/AD continuum, as well as to the way in which precise parts of memory decline along with the progression of the neurobiological anomalies. Interestingly, memory studies have shown that the changes from MCI to AD reflect both qualitative effects, for example those found in the domain of working memory, and quantitative effects, for example those found on text memory tasks. Yet, much work remains to be done on the natural history from MCI to AD and on its relation with the underlying brain modifications.

Studies of memory in MCI also have implications for clinical diagnosis and management. For example, knowledge of impaired and intact capacities in MCI can be exploited through intervention studies, the goal of which is to optimize memory performance. Because memory deficit is selective during that phase, MCI may be envisioned as an optimal period to teach patients how to use optimal encoding strategies. In a recent study, we have shown that persons with MCI can improve their memory capacities to the same extent as healthy controls when they are taught mnemotechnics because they promote a more elaborate

encoding of information (Belleville et al., 2006). This illustrates that studies of memory in MCI, in addition to having important theoretical significance, can have profound clinical implications.

## **Acknowledgements**

SB is supported by an FRSQ Chercheur national grant. Her studies on MCI and AD benefit from a financial support from CIHR, VRQ-CONCOV, HSF-ASC-HSF-Pfizer partnership, REPAR and CAREC. MCM benefits from NSERC and FRSQ Ph.D. scholarships. SSR is supported by an NSERC Undergraduate student research award.

## Reference list

- Adam, S., Van der Linden, M., Ivanoiu, A., Juillerat, A.-C., Bechet, S., & Salmon, E. (2007) Optimization of encoding specificity for the diagnosis of early Alzheimer's disease: the RI-48 task. *J. Clin. Exp. Neuropsychol.*, 29, no. 5, pp. 477-487.
- Alescio-Lautier, B., Michel, B. F., Herrera, C., Elahmadi, A., Chambon, C., Touzet, C., & Paban, V. (2007) Visual and visuospatial short-term memory in mild cognitive impairment and Alzheimer disease: Role of attention. *Neuropsychologia*, 45, no. 8, pp. 1948-1960.
- Baddeley, A.D., Baddeley, H.A., Bucks, R.S., & Wilcock, G.K. (2001). Attentional control in Alzheimer's disease. *Brain*, 124, no. 8, pp. 1492-1508.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Eds.), *The Psychology of Learning and Motivation*, Vol. 8, New York: Academic Press, pp. 47-90.
- Baddeley, A.D., Logie, R., Bressi, S., Della Sala, S., & Spinnler, H. (1986). Dementia and working memory. *Q. J. Exp. Psychol. A*, 38, no. 4, pp. 603-618.
- Becker, J.T. & Overman, A.A. (2002) The memory deficit in Alzheimer's disease. In A.D. Baddeley, M.D. Kopelman & B. Wilson (Eds.), *The Handbook of Memory Disorders*, 2<sup>nd</sup> Edition (pp 569-589). West Sussex : Wiley.
- Belleville, S. & Bélanger, S. (2006). Maladie d'Alzheimer : Mémoire de travail, fonctions exécutives et attention. In A.M. Ergis (Ed.) *Actualités sur les Démences : Aspects Cliniques et Neuropsychologiques*. Solal, Marseille, pp. 35-50.

- Belleville, S., Chatefois, J., Fontaine, F., & Peretz, I. (2002) *Mémoria: Batterie informatisée d'évaluation de la mémoire pour Mac et PC*. Montréal: Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal.
- Belleville, S., Chertkow, H. & Gauthier, S. (in press) Working memory and control of attention in persons with Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *Neuropsychology*.
- Belleville, S., Peretz, I., & Malenfant, D. (1996) Examination of the working memory components in normal aging and in dementia of the Alzheimer type. *Neuropsychologia*, 34, no. 3, pp. 195-207.
- Belleville, S., Rouleau, N., & Caza, N. (1998) Effect of normal aging on the manipulation of information in working memory. *Mem. Cognit.*, 26, no. 3, pp. 572-83.
- Belleville, S., Rouleau, N., & Van der Linden, M. (2006) Use of the Hayling task to measure inhibition of prepotent responses in normal aging and Alzheimer's disease. *Brain Cogn.*, 62, no. 2, pp. 113-119.
- Belleville, S., Rouleau, N., Van der Linden, M., & Collette, F. (2003) Effect of manipulation and irrelevant noise on working memory capacity of patients with Alzheimer's dementia. *Neuropsychology*, 17, no. 1, pp. 69-81.
- Bennett, I.J., Golob, E.J., Parker, E.S., & Starr, A. (2006) Memory evaluation in mild cognitive impairment using recall and recognition tests. *J. Clin. Exp. Neuropsychol.*, 28, no. 8, pp. 1408-1422.
- Bennett, D.A., Wilson, R.S., Schneider, J.A., Evans, D.A., Beckett, L.A., Aggarwal, N.T., Barnes, L.L., Fox, J.H., & Bach, J. (2002) Natural history of mild cognitive impairment in older persons. *Neurology*, 59, no. 2, pp.198-2005.

- Burgess, P.W., & Shallice, T. (1996) Response suppression, initiation and strategy use following frontal lobe lesions. *Neuropsychologia*, 34, no. 4, pp. 263-272.
- Burgess, P.W., & Shallice, T. (1997). *The Hayling and Brixton test*. Harcourt Assessment. The Psychological Corporation.
- Cadilhac, C., Gély-Nargeot, M.-C., Virbel, J., & Nespoulous, J.L. (1997) De l'essentiel aux détails : le rappel des structures narratives par des sujets âgés normaux et déments. In J. Lambert & J.-L. Nespoulous (Eds). *Perception auditive et compréhension du langage*. Solal, Marseille, pp. 295-317.
- Chen, P., Ratcliff, G.D., Belle, S.H., Cauley, J.A., DeKosky, S.T., & Ganguli, M. (2000) Cognitive tests that best discriminate between presymptomatic AD and those who remain nondemented. *Neurology*, 55, no. 12, pp. 1847-1853.
- Collie, A., Myers, C., Schnirman, G., Wood, S., & Maruff, P. (2002) Selectively impaired associative learning in older people with cognitive decline. *J. Cogn. Neurosci.*, 14, no. 3, pp. 484-492.
- Dannhauser, T.M., Walkerm Z., Stevens, T., Lee, L., Seal, M., & Shergill, S.S. (2005) The functional anatomy of divided attention in amnesic mild cognitive impairment. *Brain*, 128, no. 6, pp. 1418-1427.
- Della Sala, S., Cowan, N., Beschin, N., & Perini, M. (2005) Just lying there, remembering: Improving recall of prose in amnesic patients with mild cognitive impairment by minimising interference. *Memory*, 13, no. 3-4, pp. 435-440.

- Dudas, R.B., Clague, F., Thompson, S.A., Graham, K.S., & Hodges, J.R. (2005) Episodic and semantic memory in mild cognitive impairment. *Neuropsychologia*, 43, no. 9, pp. 1266-1276.
- Ergis, A.M., Gély-Nargeot, M-C. & Van der Linden, M. (2005) *Les troubles de la mémoire dans la maladie d'Alzheimer*. Solal, Marseille, pp. 1-387.
- Elias, M.F., Beiser, A., Wolf, P.A., Au, R., White, R.F., & D'Agostino, R.B. (2000) The preclinical phase of Alzheimer's disease: A 22-year prospective study of the Framingham Cohort. *Arch. Neurol.*, 57, no. 6, pp. 808-813.
- Flicker, C., Ferris, S.J., & Reisberg, B. (1991) Mild cognitive impairment in the elderly: predictors of dementia. *Neurology*, 41, no. 7, pp.1006-1009.
- Frisoni, G.B., Galluzzi, S., Bresciani, L., Zanetti, O. & Geroldi, C. (2002) Mild cognitive impairment with subcortical vascular features: Clinical characteristics and outcome. *J. Neurol*, 249, no. 10, pp. 1423-1432.
- Gauthier, S., Reisberg, B., Zaudig, M., Petersen, R.C., Richie, K., Broich, K., Belleville, S., Brodaty, H., Bennett, D., Chertkow, H., Cummings, J.L., de Leon, M.J., Feldman, H., Ganguli, M., Hampel, H., Scheltens, P., Tierney, M.C., Whitehouse, P., & Winblad, B. (2006) Mild cognitive impairment. *Lancet*, 367, no. 9518, pp. 1262-1270.
- Goldman, W.P., Baty, J.D., Buckles, V.D., Sahrman, S., & Morris, J.C. (1999) Motor dysfunction in mildly demented AD individuals without extrapyramidal signs. *Neurology*, 53, no. 5, pp. 956-962.
- Grober, E., & Kawas, C. (1997) Learning and retention in preclinical and early Alzheimer's disease. *Psychol. Aging*, 12, no. 1, pp. 183-188.



- Hudon, C., Belleville, S., Souchay, C., Gély-Nargeot, M.-C., Chertkow, H., & Gauthier, S. (2006) Memory for gist and detail information in Alzheimer's disease and Mild cognitive impairment. *Neuropsychology*, 20, no. 5, pp. 566-577.
- Ivanoiu, A., Adam, S., Van der Linden, M., Salmon, E., Juillerat, A.-C., Mulligan, R., & Seron, X. (2005) Memory evaluation with a new cued recall test in patient with mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *J. Neurol.*, 252, no. 1, pp. 47-55.
- Jack, C.R., Petersen, R.C., Xu, Y.C., O'Brien, P.C., Smith, G.E., Ivnik, R.J., Boeve, B.F., Waring, S.C., Tangalos, E.G., & Kolmen, E. (1999) Prediction of AD with MRI-based hippocampal volume in mild cognitive impairment. *Neurology*, 52, no. 7, pp. 1397-1403.
- Kawas, C.H., Corrada, M.M., Brookmeyer, R., Morrison, A., Resnick, S.M., Zonderman, A.B., & Arenberg, D. (2003) Visual memory predicts Alzheimer's disease more than a decade before diagnosis. *Neurology*, 60, no. 7, pp. 1089-1093.
- Kintsch, W., & Van Dijk, T.A. (1978) Toward a Model of Text Comprehension and Production. *Psychol. Rev.*, 85, no. 5, pp. 363-394.
- Kluger, A., Ferris, S.H., Golomb, J., Mittelman, M.S. & Reisberg, B. (1999) Neuropsychological prediction of decline to dementia in nondemented elderly. *J. Geriatr. Psychiatry Neurol.*, 12, no. 4, pp. 168-179.
- Kluger, A., Gianutsos, J.G., Golomb, J., Ferris, S.H., & Reisberg, B. (1997) Motor/psychomotor dysfunction in normal aging, mild cognitive decline, and early Alzheimer's disease: diagnostic and differential diagnostic features. *Int. Psychogeriatr.*, 9, suppl. 1, pp. 307-316.

- Labelle, M.-A., Belleville, S., Bocti, C., Massoud, F., Mellah, S., Villeneuve, S., Joncas, S., Gilbert B., Fontaine, F., Enriquez, A., & Gauthier, S. (2007). *Caractérisation de la mémoire de travail et des fonctions exécutives dans le trouble cognitif léger d'origine vasculaire*. Colloquium for the 25th anniversary of the Centre de recherche Institut universitaire de gériatrie de Montréal, Montréal, Canada.
- Lambon Ralph, M.A., Patterson, K., Graham, N., Dawson, K., & Hodges, J.R. (2003) Homogeneity and heterogeneity in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease: a cross-sectional and longitudinal study of 55 cases. *Brain*, 126, no. 11, pp. 2350-2362.
- Lekeu, F. & Van der Linden, M. (2005) Le fonctionnement de la mémoire épisodique dans la maladie d'Alzheimer. In A.M. Ergis, M.C. Nargeot & M. Van der Linden (Eds.) *Les troubles de la mémoire dans la maladie d'Alzheimer*. Solal, Marseille, pp. 73-117.
- Levinoff, E., Saumier, D., & Cherkow, H. (2005) Focused attention deficits in patients with Alzheimer's deficits and mild cognitive impairment. *Brain Cogn.*, 57, no. 2, pp. 127-130.
- Loewenstein, D.A., Acevedo, A., Luis, C., Crum, T., Barker, W., & Duara, R. (2004) Semantic interference deficits and the detection of mild Alzheimer's disease and mild cognitive impairment without dementia. *J. Int. Neuropsychol. Soc.*, 10, no. 1, pp. 91-100.
- Maruff, P., Collie, A., Darby, D., Weaver-Cargin, J., Masters, C., & Currie, J. (2004) Subtle memory decline over 12 months in mild cognitive impairment. *Dement. Geriatr. Cogn. Disord.*, 18, no. 3-4, pp. 342-348.

- Masur, D.M., Fuld, P.A., Blau, A.D., Crystal, H., & Aronson, M.K. (1990) Predicting development of dementia in the elderly with the selective reminding test. *J. Clin. Exp. Neuropsychol.*, 12, no. 4, pp. 529-538.
- Morris, R.G. (1986). Short-term forgetting in senile dementia of the Alzheimer's type. *Cognitive Neuropsychologia*, 3, 77-97.
- Morris, R.G., & Becker, J.T. (2004) A cognitive neuropsychology of Alzheimer's disease. In R.G. Morris and J.T. Becker (Eds.), *Cognitive Neuropsychology of Alzheimer's disease*. Oxford University Press, New York, pp. 3-10.
- Moulin, C.J.A., James, N., Freeman, J.E., & Jones, R.W. (2004) Deficient acquisition and consolidation: intertrial free recall performance in Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *J. Clin. Exp. Neuropsychol.*, 26, no. 1, pp. 1-10.
- Nordahl, C.W., Ranganath, C., Yonelinas, A.P., DeCarli, C., Reed, B.R., & Jagust, W.J. (2005) Different mechanisms of episodic memory failure in mild cognitive impairment. *Neuropsychologia*, 43, no. 11, pp. 1688-1697.
- Perri, R., Carlesimo, G.A., Serra, L., Caltagirone, C., & The Early Diagnosis Group of the Italian Interdisciplinary Network on Alzheimer's Disease. (2005) Characterization of memory profile in subjects with amnesic mild cognitive impairment, *J. Clin. Exp. Neuropsychol.*, 27, no. 8, pp. 1033-1055.
- Perry, R.J., & Hodges, J.R. (1999) Attention and executive deficits in Alzheimer's disease: A critical review. *Brain*, 122, no. 3, pp. 383-404.
- Petersen, R.C. (2003) *Mild Cognitive Impairment: Aging to Alzheimer's disease*. Oxford: University Press.

- Petersen, R.C., Smith, G.E., Waring, S.C., Ivnik, R.J., Kokmen, E., & Tangelos, E.G. (1997) Aging, memory, and mild cognitive impairment. *Int. Psychogeriatr.*, 9, suppl. 1, pp. 65-69.
- Petersen, R.C., Smith, G.E., Waring, S.C., Ivnik, R.J., Tangalos, E.G., & Kokmen, E. (1999) Mild cognitive impairment : clinical characterization and outcome. *Arch. Neurol.*, 56, no. 3, pp. 303-308.
- Ritchie, K. (2004) Mild Cognitive impairment: an epidemiologic perspective. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 6, no. 4, pp 401-408.
- Tierney, M.C., Szalai, J.P., Snow, W.G., Fisher, R.H., Nores, A., Nadon, G., Dunn, E., & George-Hyslop, P.H. (1996) Prediction of probable Alzheimer's disease in memory-impaired patients: A prospective longitudinal study. *Neurology*, 46, no. 3, pp. 661-665.
- Wylie, S.A., Ridderinkhof, K. R., Eckerle, M. K., & Manning, C. A. (2007) Inefficient response inhibition in individuals with mild cognitive impairment. *Neuropsychologia*, 45, no. 7, pp. 1408-1419.

Figure 1

*Theoretical changes in cognitive functions in persons with healthy aging and persons with Alzheimer's disease.*

