

École doctorale des Sciences de la Vie et de la Santé

Unité INSERM 1114 « Neuropsychologie Cognitive et Physiopathologie de la Schizophrénie »

THÈSE

présentée par

Bérengère STAUB

Soutenue le **17 septembre 2014**

pour obtenir le grade de **Docteur de l'Université de Strasbourg**

Discipline : Sciences du Vivant

Spécialité : Neurosciences

**Attention soutenue et vieillissement
normal: étude des mécanismes
cognitifs et neuronaux associés au
contrôle attentionnel**

THÈSE dirigée par :

Mme BACON Elisabeth

Chargée de Recherche (HDR), Université de Strasbourg

RAPPORTEURS :

M. AUDIFFREN Michel

Mme POSTAL Virginie

Professeur, Université de Poitiers

Maître de Conférences (HDR), Université Bordeaux Segalen

AUTRE MEMBRE DU JURY :

M. KELCHE Christian

Directeur de recherches, Université de Strasbourg

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier en premier lieu mon encadrante, Anne Bonnefond. Anne, je te suis extrêmement reconnaissante pour tout ce que tu m'as appris, tant d'un point de vue professionnel que d'un point de vue humain. Merci pour ta confiance, ta bienveillance, et ton exigence. Merci pour ta disponibilité, ainsi que pour la qualité et la rigueur de ton encadrement. Grâce à toi j'ai pu réaliser cette thèse dans des conditions idéales. Merci beaucoup.

Je remercie également Elisabeth Bacon et Anne Giersch de m'avoir accueillie au sein de l'unité et de m'avoir permis de poursuivre ma thèse dans les meilleures conditions.

J'aimerais aussi remercier les membres du jury, Michel Audiffren, Christian Kelche et Virginie Postal, d'avoir accepté de juger ce travail.

Un grand merci à toutes les personnes, jeunes et âgées, qui ont accepté de participer aux différentes études.

Merci également à celles et ceux qui m'ont apporté, à un moment ou à un autre, leur aide ou leur soutien, et plus largement leurs ondes positives : Rémi Capa, Nadège Doignon-Camus, Bich-Tuy Pham et Sébastien Weibel.

Merci aux anciens du LINC, dont l'aide a été précieuse et la présence plus que reconfortante : Françoise Haenel, Alain Hoeft et Thierry Pebayle.

Merci aux doctorantes, docteurs et doctresses que j'ai eu le plaisir de côtoyer tout au long (ou presque) de cette thèse: Mélissa Allé, Anne-Clémence Chaillou, Eglantine Ferrand-Devouge et Céline Duval. Merci pour les conseils en tout genre, le soutien moral (surtout sur la fin... !) et la bonne humeur contagieuse.

Je tiens également à remercier Gwendoline Mahé, une grande camarade et une vraie référence. Merci de m'avoir fait bénéficier de ton expérience, merci pour ton esprit de solidarité, et pour les inoubliables pauses-déjeuner !

Et enfin merci à mes parents et à ma sœur, une famille rêvée.

TABLE DES MATIERES

PREMIERE PARTIE: INTRODUCTION	1
Chapitre 1 : Attention soutenue et contrôle attentionnel.....	2
I. L'attention soutenue: un composant à part entière.....	3
1. Définition et méthodes d'étude.....	3
2. Théories explicatives de la baisse de vigilance et/ou des erreurs d'attention	6
3. Circuits neuronaux médiatisant les capacités d'attention soutenue	8
II. Le contrôle attentionnel : diversité des mécanismes	9
1. Définition.....	9
2. Mécanismes cognitifs et neuronaux	10
III. Mécanismes de contrôle attentionnel en situation d'attention soutenue : intérêt de l'approche électrophysiologique.....	12
1. Mécanismes de contrôle proactif	13
2. Mécanismes de contrôle réactif consécutifs à un stimulus.....	14
2.1. Allocation attentionnelle.....	14
2.2. Traitement du conflit : détection et résolution	15
3. Mécanismes de contrôle réactif consécutifs à une réponse	17
Chapitre 2 : Attention soutenue et contrôle attentionnel dans le vieillissement normal.....	21
I. Effet de l'âge sur les capacités d'attention soutenue : des résultats contradictoires.....	22
1. Tâches de détection : répondre à des stimuli cibles rares.....	23
1.1. Détérioration	23
1.2. Préservation	25
1.3. Détérioration/préservation.....	25
2. Tâches d'inhibition : inhiber un comportement en cours	26
II. Effets de l'âge sur les mécanismes de contrôle attentionnel	28
1. Mécanismes de contrôle proactif	29
2. Mécanismes de contrôle réactif consécutifs à un stimulus.....	30
2.1. Allocation attentionnelle.....	30
2.2. Traitement du conflit	31
3. Mécanismes de contrôle réactif consécutifs à une réponse	33

Revue de la littérature	35
Chapitre 3 : Objectifs	46
DEUXIEME PARTIE: METHODOLOGIE	51
I. Caractéristiques des sujets.....	52
II. Paradigmes expérimentaux.....	53
1. Sustained Attention to Response Task (SART) et tâche de détection de format traditionnel.....	53
2. Error Awareness Task (EAT)	54
III. Enregistrements électrophysiologiques et potentiels évoqués.....	55
1. Enregistrements électroencéphalographiques	55
1.1. Principes d'électrophysiologie	55
1.2. Paramètres d'enregistrement on-line.....	57
2. Les potentiels évoqués	57
2.1. Principe.....	57
2.2. Etapes du traitement off-line	57
IV. Questionnaires subjectifs.....	60
1. Motivation	60
2. Vagabondage d'esprit	60
3. NASA-TLX.....	61
TROISIEME PARTIE: CONTRIBUTIONS EXPERIMENTALES	62
Etude 1.....	63
Rappel des résultats principaux de l'étude 1 et objectifs de l'étude 2.....	71
Etude 2.....	73
Rappel des résultats principaux de l'étude 2 et objectifs de l'étude 3.....	95
Etude 3.....	96
Rappel des résultats principaux de l'étude 3 et objectifs de l'étude 4.....	126
Etude 4.....	127

QUATRIEME PARTIE: DISCUSSION	154
I. Effets différenciés de l'âge sur les capacités d'attention soutenue	155
II. Spécificités des sujets âgés dans l'engagement des processus automatiques et contrôlés	160
III. Spécificités des sujets âgés dans l'activation des mécanismes de contrôle attentionnel	161
1. Activation globalement plus importante des mécanismes de contrôle	162
2. Traitement attentionnel peu différencié entre les stimuli cibles et non-cibles	166
3. Activation maintenue ou augmentée des mécanismes de contrôle au fil de la tâche	167
4. Topographie plus frontale des régions sous-tendant les mécanismes de contrôle ..	170
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	172
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	175
ANNEXES	200
Questionnaire de motivation	201
Questionnaire de vagabondage d'esprit	202
NASA-TLX.....	203

PREMIERE PARTIE: INTRODUCTION

Chapitre 1 : Attention soutenue et contrôle attentionnel

L'attention n'est pas un concept unitaire mais le nom donné à un ensemble de processus cérébraux pouvant interagir, les uns avec les autres ou avec d'autres processus, lors de la réalisation de différentes tâches perceptives, cognitives et/ou motrices. Dans le modèle proposé par Parasuraman (1998) (qui reprend le modèle antérieur de Posner et Bois, 1971), l'attention regroupe trois composantes: la sélection, le contrôle et la vigilance, ayant chacune des caractéristiques fonctionnelles et structurales distinctes. La sélection renvoie à la capacité à orienter ou à focaliser son attention vers/sur un stimulus ou une source d'information, le contrôle permet la coordination et la gestion des processus mis en jeu pour le traitement de l'information, et la vigilance – ou attention soutenue – renvoie à la capacité à maintenir efficacement son activité cognitive sur une source de stimulation ou une tâche. C'est à ces deux dernières composantes, et à leurs interactions dans le cadre du vieillissement normal, que nous nous sommes précisément intéressés dans ce travail de thèse. Avant d'aborder les effets du vieillissement sur ces composantes attentionnelles (chapitre 2), nous allons dans ce premier chapitre définir chacune d'entre elles (I et II) puis détailler les mécanismes de contrôle attentionnel activés en situation d'attention soutenue et les indicateurs comportementaux et de potentiels évoqués qui y sont associés (III).

I. L'attention soutenue: un composant à part entière

1. Définition et méthodes d'étude

L'attention soutenue est une sorte d'attention basique, indispensable et déterminante pour la bonne marche d'un grand nombre de fonctions cognitives et donc pour l'ensemble des comportements dirigés vers un but (Parasuraman, Warm, & See, 1998). Dans la littérature, deux approches différentes coexistent pour étudier l'attention soutenue. Chacune repose sur une méthodologie spécifique, permettant de mettre en évidence la difficulté que représente la capacité à maintenir son attention sur une tâche.

Selon la première approche, l'attention soutenue est définie comme un **état de préparation à détecter et à répondre à certains changements de l'environnement**

		Type d'essai	
		Signal + Bruit (S+B)	Bruit (B)
Réponse du sujet	OUI (déecté) (s)	Détection correcte $p(s/S)$	Fausse alarme $p(s/B)$
	NON (non déecté) (b)	Omission $p(b/S)$	Rejet correct $p(b/B)$

Figure 1. Théorie de la détection du signal.

p = probabilité (e.g. $p(s/S)$ = probabilité que le signal soit décté quand le Signal est présenté).

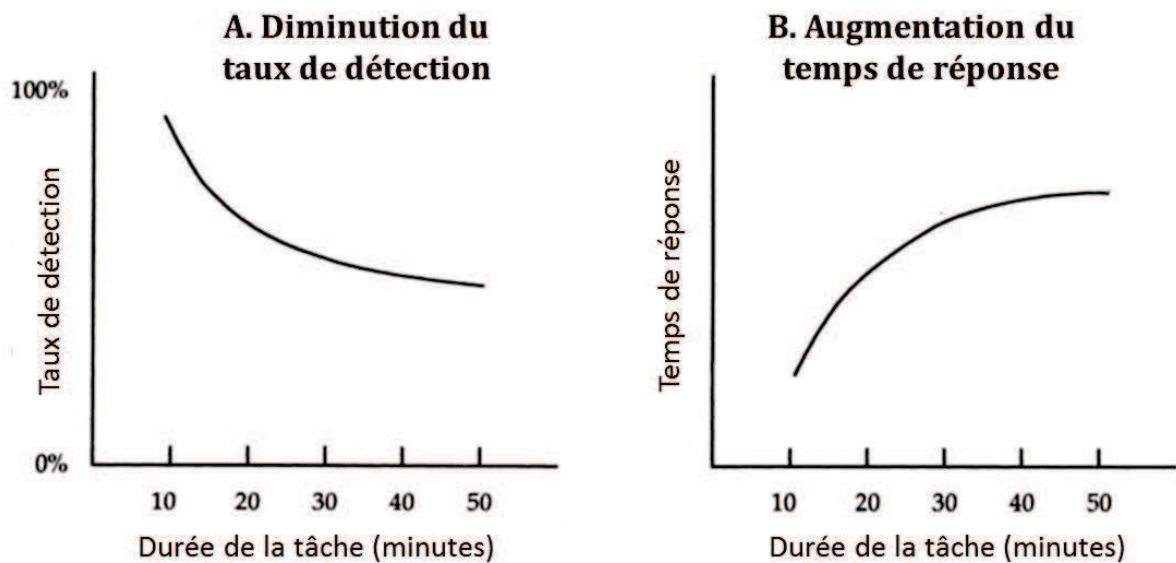


Figure 2. Mise en évidence expérimentale de la baisse de vigilance.

La baisse de vigilance correspond soit à une diminution du taux de décté (A) soit à une augmentation du temps de réponse (B) au fil de la tâche, et constitue un indicateur des capacités d'attention soutenue.

apparaissant à des intervalles de temps aléatoires (Mackworth, 1957). Historiquement, les premiers travaux ont été initiés par Mackworth. Ce psychologue a développé le test de l'horloge, une tâche de détection de deux heures durant laquelle le participant doit suivre les sauts de la trotteuse d'une horloge, et signaler les rares occasions (environ 3 à 5% du temps) où la trotteuse effectue un saut double (Mackworth, 1948). Cette tâche princeps a donné naissance à de nombreuses autres tâches, se caractérisant par leur longueur et leur monotonie, et dont le principe est toujours de détecter des cibles apparaissant de façon rare et imprévisible (Parasuraman et al., 1998). L'une des plus utilisées est le Continuous Performance Test (CPT, Rosvold, Mirsky, Sarason, Bransome, & Beck, 1956), dans laquelle des lettres sont présentées successivement sur un écran d'ordinateur. Le sujet a pour consigne d'appuyer sur un bouton réponse à l'apparition de la lettre X et d'ignorer les autres lettres (« X-CPT »). Une version plus complexe de cette tâche existe. Dans celle-ci, il est demandé au participant de détecter la lettre X uniquement lorsqu'elle est précédée de la lettre A (« AX-CPT »). D'autres tâches, reposant sur le même principe et manipulant des caractéristiques des stimuli ont également été développées. Par exemple, Nuechterlein, Parasuraman, et Jiang (1983) ont développé une tâche de détection de chiffres dans laquelle la qualité visuelle des stimuli est manipulée. Dans cette tâche où les chiffres de 0 à 9 sont présentés successivement et de façon aléatoire, le sujet doit appuyer sur un bouton réponse à l'apparition du chiffre 0, les stimuli pouvant être dégradés (altération de la netteté de l'image) selon différents niveaux (faible, moyen, élevé).

Dans toutes ces tâches dites de format traditionnel (traditionally formatted tasks, TFT, Stevenson, Russel, & Helton, 2011), les performances des sujets sont décrites à partir du calcul des paramètres classiques de la Théorie de la Détection du Signal (détectations correctes, rejets corrects, omissions et fausses alarmes) (figure 1) et des temps de réponse. Le découpage de la tâche en différentes périodes de temps de durée équivalente permet d'étudier le décours temporel des performances. Classiquement, on observe un déclin rapide des performances du participant, et ce, dès les 15 premières minutes de tâche (figure 2). Ce phénomène est connu sous le nom de **baisse de vigilance** (Davies & Parasuraman, 1982). Dans cette approche traditionnelle, la baisse de vigilance (c'est-à-dire la diminution

Paramètres de la théorie de la détection du signal



Critère de sensibilité:

$$d' = p(s/S) - p(s/B)$$



Critère décisionnel:

$$\beta = p(s/S) / p(s/B)$$

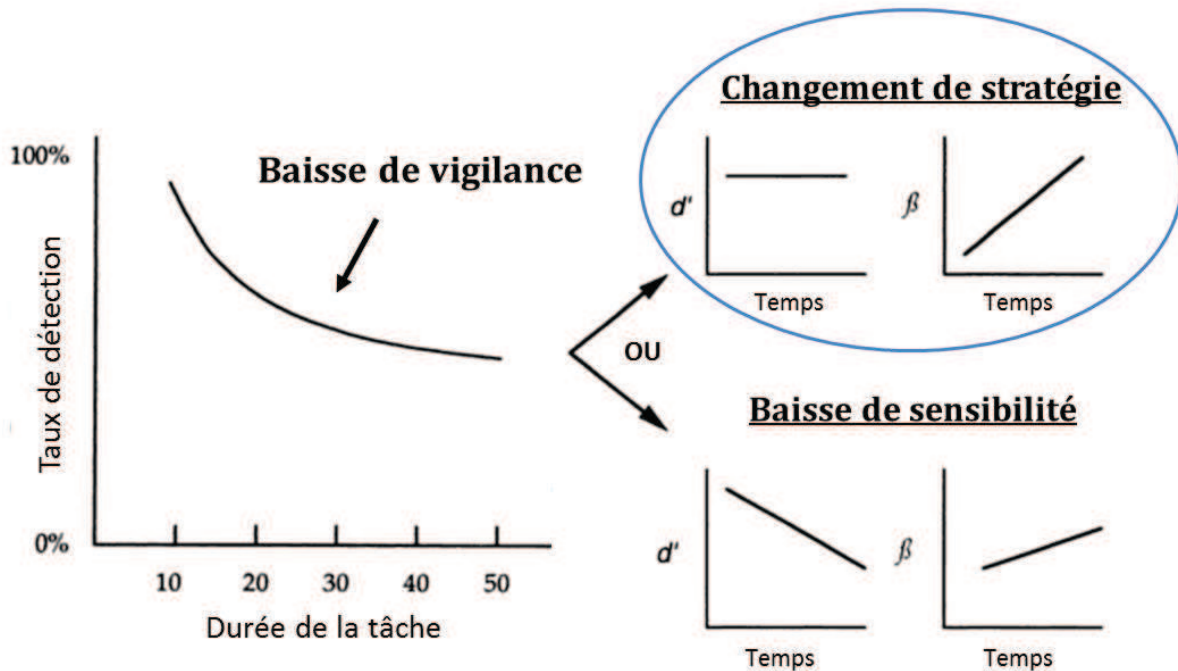


Figure 3. Application de la théorie de la détection du signal à la baisse de vigilance

La diminution du taux de détection est due à un changement de stratégie (augmentation du β) et non à une baisse de sensibilité (diminution du d').

du nombre de détections correctes ou l'augmentation du temps de réponse au fil de la tâche) constitue un indicateur des capacités d'attention soutenue. Ces mêmes paramètres peuvent être utilisés pour évaluer le niveau global de vigilance (nombre total de détections correctes ou temps de réponse moyen). En plus de la mise en évidence expérimentale de la baisse de vigilance, ces premiers travaux ont permis de montrer que la baisse de vigilance n'est pas due à une baisse de sensibilité perceptive du sujet (diminution du d'), mais à un changement de stratégie, à savoir l'adoption par le sujet d'un critère de réponse de plus en plus prudent (augmentation du β) (Warm & Jerison, 1984) (figure 3).

La seconde approche, plus récente, définit l'attention soutenue comme la **capacité à inhiber une réponse bien apprise à de rares occasions**. Cette approche a été initiée par une équipe irlandaise avec le développement d'une tâche d'inhibition, la Sustained Attention to Response Task (SART, Robertson, Manly, Andrade, Baddeley, & Yiend, 1997). Dans cette tâche, les chiffres de 1 à 9 sont présentés sur un écran d'ordinateur de façon successive et aléatoire. Le sujet a pour consigne d'appuyer sur un bouton réponse à l'apparition de tous les chiffres à l'exception du chiffre 3, pour lequel la réponse doit être inhibée. De manière générale, dans ce type de tâche d'inhibition, appelée tâche de Go/No-Go, le participant doit donc répondre à l'apparition de stimuli non-cibles (ou non-critiques), les essais Go, très fréquents, et ne pas répondre à l'apparition de stimuli cibles (ou critiques), les essais No-Go, beaucoup moins fréquents (e.g. probabilité d'apparition = 0,1 dans la SART). Ainsi, contrairement aux tâches traditionnelles décrites précédemment, le participant doit ici répondre à la grande majorité des stimuli. Selon ces auteurs, ces tâches d'inhibition reproduisent mieux les situations de la vie quotidienne au cours desquelles une activité routinière ou répétitive, reposant majoritairement sur des processus automatiques, doit être brutalement stoppée (Dockree, Kelly, Roche, Hogan, Reilly, & Robertson, 2004 ; Dockree et al., 2006 ; Robertson et al., 1997). Dans cette approche, l'indicateur utilisé pour évaluer les capacités d'attention soutenue est le nombre d'erreurs d'inhibition, dites « erreurs de commission ». Ces **erreurs d'attention** (ou lapses attentionnels) apparaissent généralement très rapidement, dès les cinq premières minutes de tâche.

2. Théories explicatives de la baisse de vigilance et/ou des erreurs d'attention

La théorie de l'éveil (Eysenck, 1982), stipulant que la dégradation des capacités d'attention soutenue résulterait d'une diminution de l'éveil cortical et dominante dans la littérature pendant de nombreuses années, a aujourd'hui été abandonnée. En effet, si des études électrophysiologiques montrent un lien entre performances d'attention soutenue et éveil cortical (mis en évidence par des corrélations entre les performances et l'activité dans les basses fréquences de l'électroencéphalogramme) (Daniel, 1967 ; Makeig & Inlow, 1993), il n'existe cependant aucune donnée montrant qu'une diminution du niveau d'éveil cortical est suffisante pour entraîner une baisse de vigilance (Parasuraman et al., 1998). Deux théories tentent aujourd'hui de rendre compte de notre (in)capacité à maintenir efficacement notre attention focalisée sur une source de stimulation ou sur une tâche : la théorie des ressources attentionnelles et la théorie de l'automatisation ou du désengagement.

Selon la **théorie des ressources attentionnelles**, le déclin des performances au fil de la tâche résulterait d'une diminution progressive des ressources attentionnelles (Grier et al., 2003). Ces ressources limitées (Davies & Parasuraman, 1982 ; Grier et al., 2003 ; Kahneman, 1973 ; Matthews, 2000 ; Warm, Parasuraman, & Matthews, 2008) ne pourraient en effet être renouvelées en raison de la mobilisation continue nécessitée par ces tâches (Helton & Warm, 2008 ; Helton & Russell, 2010 ; Hitchcock, Dember, Warm, Moroney, & See 1999 ; Shaw et al. 2009). Les études mettant en évidence un déclin plus important des performances d'attention soutenue dans des tâches plus demandeuses en attention apportent des arguments expérimentaux à cette théorie (Parasuraman, 1986). Par exemple, Helton et Russell (2011), en utilisant une tâche de détection de lettres, montrent une baisse de vigilance plus accentuée lorsque les sujets se trouvent en situation de double tâche (mémoriser un pattern de lettres ou de points) comparativement à une situation de simple tâche. Des arguments plus physiologiques viennent également renforcer cette théorie. La vitesse du flux sanguin cérébral pourrait être un indicateur de la réserve en ressources

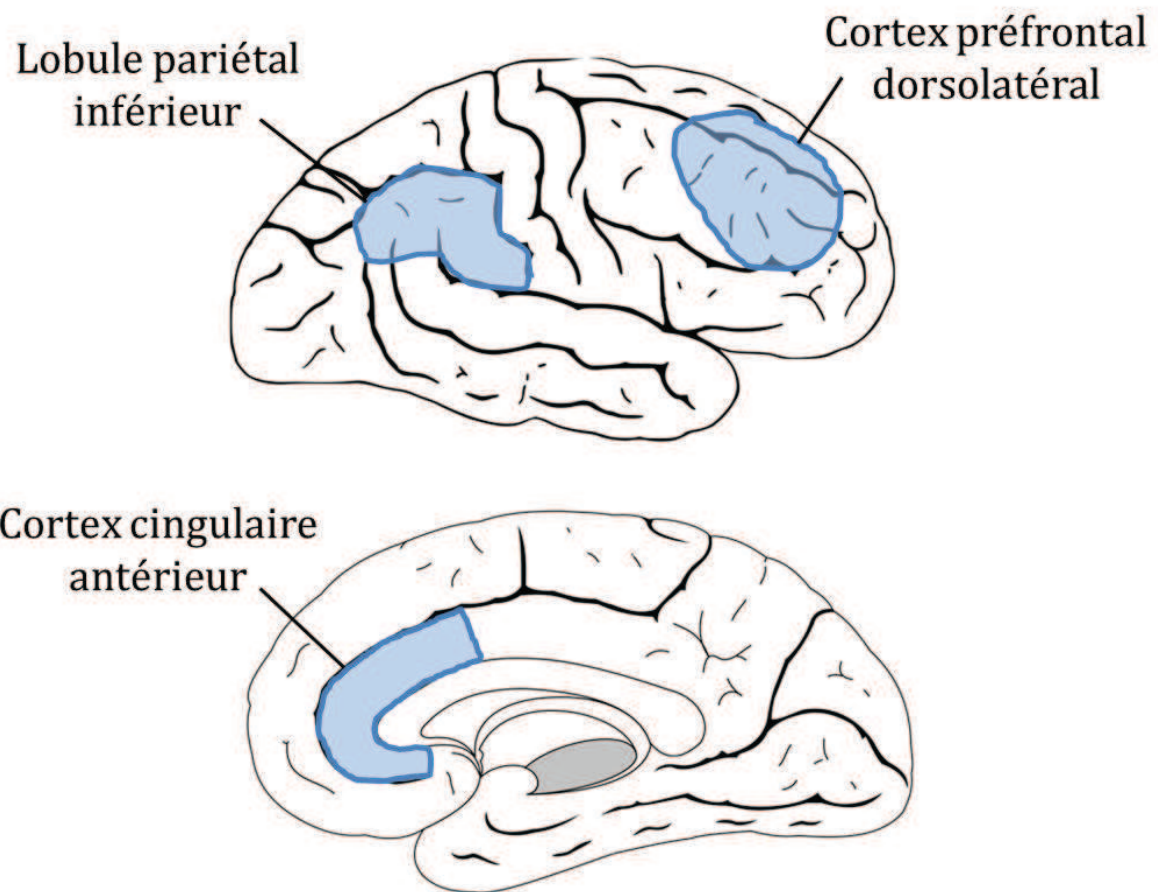


Figure 4. Représentation des principales régions corticales sous-tendant les capacités d'attention soutenue.

physiologiques (Hitchcock et al., 2003 ; Schnittger, Johannes, Arnavaz, & Munte, 1997 ; Shaw et al., 2009 ; Shaw, Guagliardo, de Visser, & Parasuraman, 2010). Shaw et al. (2009) montrent par exemple en utilisant deux tâches de détection de 40 minutes (une visuelle, une auditive), une baisse du taux de détections correctes au fil des deux tâches, qui s'accompagne parallèlement d'une diminution de la vitesse du flux sanguin cérébral, notamment dans l'hémisphère droit.

Selon la **théorie de l'automatisation**, les erreurs d'attention seraient causées par des défaillances des mécanismes de contrôle cognitif (ou contrôle attentionnel). En raison de la nature répétitive, monotone et non éveillante des tâches, leur réalisation va progressivement devenir de plus en plus automatique, sollicitant de moins en moins les mécanismes de contrôle cognitif (Manly, Robertson, Galloway, & Hawkins, 1999 ; Manly et al., 2004 ; O'Connell, Bellgrove, Dockree, Lau, Fitzgerald, & Robertson 2008 ; Robertson et al., 1997). Cette théorie est notamment étayée par des résultats montrant que les individus facilement distraits (définis comme tels par des scores élevés obtenus au « questionnaire de défaillances cognitives » ; cognitive failures questionnaire, CFQ, Broadbent, Cooper, Fitzgerald, & Parks, 1982) présentent de moins bonnes performances d'attention soutenue que des individus avec de faibles scores (corrélation positive entre le taux d'erreurs dans une SART et le score au CFQ, Robertson et al., 1997). Cette théorie s'appuie également sur des résultats montrant une augmentation des rêveries ou « pensées non liées à la tâche » (score obtenu au questionnaire de vagabondage d'esprit) au fil de la réalisation d'une SART (Giambra, 1989, 1995 ; Smallwood et al., 2004). Enfin, des études d'imagerie cérébrale fonctionnelle (Tana, Montin, Cerutti, & Bianchi, 2010) ont mis en évidence une diminution de l'activité d'un réseau fronto-temporal au fil de la réalisation d'une tâche de Go/No-Go (répondre à toutes les lettres sauf le X). Ce résultat, associé un maintien des performances, suggère une réalisation de la tâche de plus en plus automatique, donc sollicitant de moins en moins de mécanismes de contrôle cognitif.

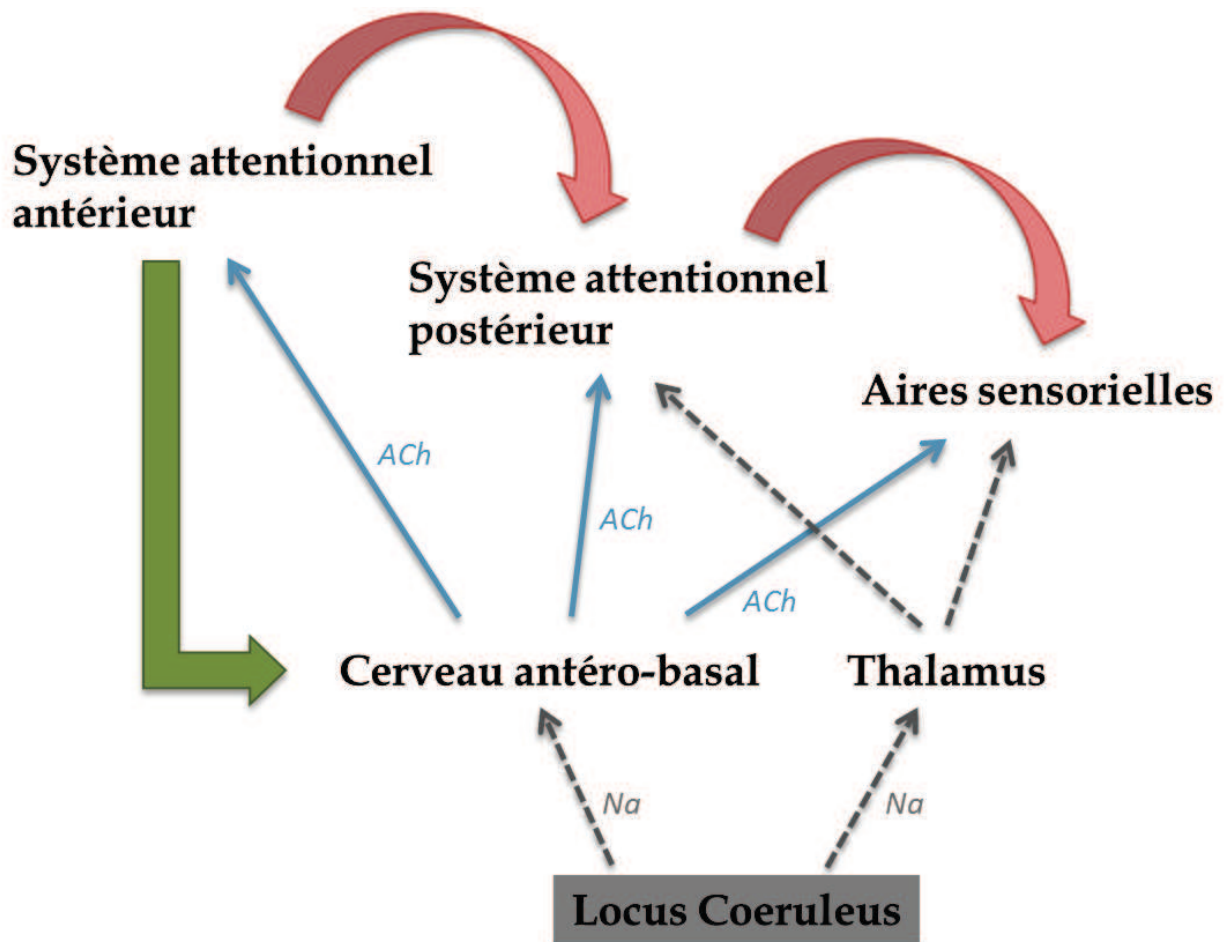


Figure 5. Illustration des composants majeurs du réseau neuronal médiatisant les performances d'attention soutenue (Sarter et al., 2001).

ACh : acétylcholine, *Na* : noradrénaline

Le système de projection cholinergique du cerveau antéro-basal est activé via des connexions directes du cortex préfrontal (*flèche verte*).

Ces efférences cholinergiques ont deux fonctions distinctes:

- l'activation directe des régions frontales (système attentionnel antérieur), pariétales (système attentionnel postérieur), et sensorielles (*flèches bleues*)
- la modulation top-down des régions pariétales et sensorielles via l'activation du système attentionnel antérieur (*flèches rouges*)

L'activation bottom-up des processus attentionnels repose sur des projections noradrénergiques issues du locus coeruleus, et qui innervent le BF et le thalamus (*flèches en pointillées*).

3. Circuits neuronaux médiatisant les capacités d'attention soutenue

Si des liens étroits existent avec l'éveil, l'attention soutenue repose sur des réseaux neuronaux qui lui sont spécifiques. En effet, des études en imagerie cérébrale ont montré que la réalisation d'une tâche d'attention soutenue est associée à l'activité d'un réseau cérébral principalement à droite, et qui comprend le cortex cingulaire antérieur, le cortex préfrontal dorsolatéral, et le lobule pariétal inférieur (Cohen, Semple, Gross, King, & Nordahl, 1992 ; Coull, 1998 ; Fink, Halligan, Marshall, Frith, Frackowiak, & Dolan, 1997 ; Pardo, Fox, & Raichle, 1991 ; Sturm & Willmes, 2001) (figure 4). Le déclin d'activité des régions fronto-temporo-pariétales au fil de la réalisation de la tâche est envisagé comme médiatisant la baisse de vigilance, c'est-à-dire la baisse des performances au fil du temps (Coull, Frackowiak, & Frith, 1998 ; Paus et al., 1997).

Par ailleurs, les études menées chez l'animal ont mis en évidence le rôle central des projections cholinergiques du cerveau antéro-basal (basal forebrain, BF) vers le cortex (Muir, Everitt, & Robbins, 1994). Il a par exemple été montré que la libération d'acétylcholine dans les régions corticales chez un animal effectuant une tâche d'attention soutenue est corrélée avec la demande en attention requise par la tâche (Himmelheber, Sarter, & Bruno, 2000), et que des lésions des neurones cholinergiques du cerveau antéro-basal entraînent de profonds déficits d'attention soutenue chez l'animal (McGaughy, Kaiser, & Sarter, 1996).

Collectivement, ces données ont permis d'établir un modèle décrivant l'attention soutenue comme reposant sur la convergence de processus ascendants (bottom-up) et descendants (top-down) (Sarter, Givens, & Bruno, 2001 ; figure 5). Les processus bottom-up correspondent aux traitements attentionnels déclenchés par les caractéristiques physiques des stimuli, dont la saillance est susceptible d'induire un effet éveillant. A l'inverse, les processus top-down désignent les mécanismes basés sur la connaissance, les attentes et les stratégies développées par le sujet au fil de la tâche. En situation d'attention soutenue, ces deux types de processus vont interagir pour optimiser les performances attentionnelles. Au cœur de ce modèle se trouve le système de projection cholinergique en provenance du cerveau antéro-basal. Ces projections cholinergiques ont deux fonctions distinctes : l'activation directe des régions frontales (système attentionnel antérieur), pariétales

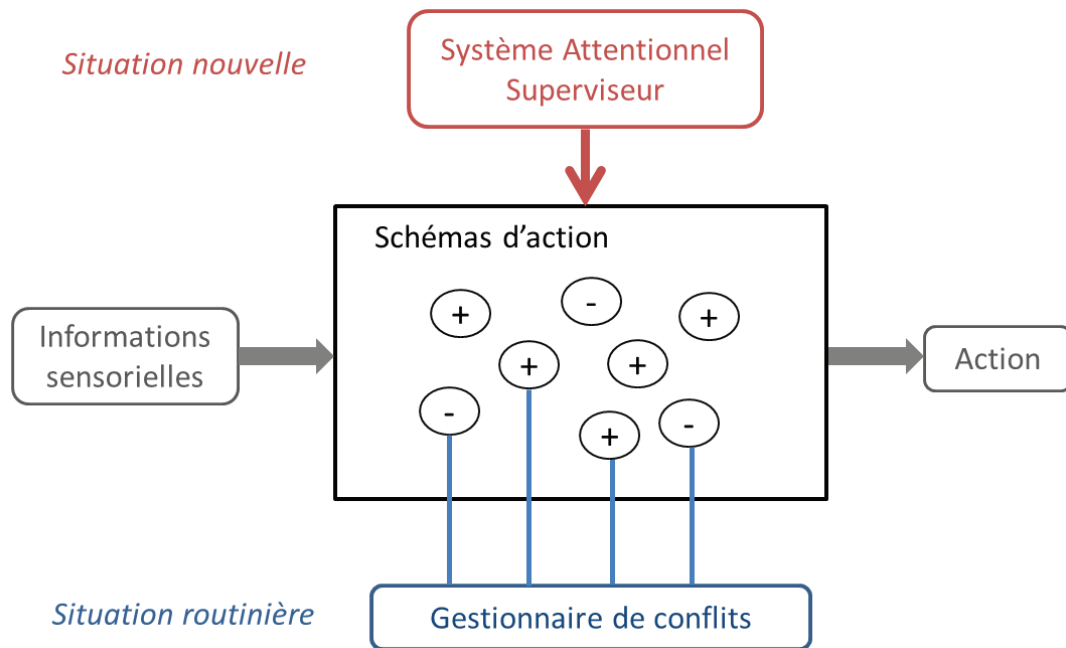


Figure 6. Représentation schématique du modèle du Système Attentionnel Superviseur (SAS) (Norman & Shallice, 1986).

Ce modèle décrit les différents niveaux de contrôle de l'action:

- le niveau des **schémas d'action**, correspondant à un ensemble de structures de connaissances contrôlant des séquences d'action ou de pensées sur-apprises. Ils sont principalement activés via les informations sensorielles, ne nécessitant que peu de contrôle attentionnel.
- lorsque plusieurs schémas d'action sont activés en même temps, un contrôle semi-automatique est nécessaire pour garantir la sélection adéquate des unités de contrôle appropriées. Cette résolution de conflit est assurée par le **gestionnaire de conflits**.
- dans certaines situations, ce gestionnaire de conflits ne va plus être suffisant, et un contrôle attentionnel volontaire va être requis. Cette fonction est attribuée au **système attentionnel superviseur** (SAS), qui va moduler le niveau d'activation des schémas d'action, et modifier les priorités d'action pour permettre au sujet d'adapter son comportement à la situation. Le SAS va intervenir dans les situations :
 - nécessitant la planification ou la prise de décision (ou sélection d'une action) ;
 - nécessitant la correction d'une erreur ou la détection d'un problème ;
 - dans lesquelles les réponses ne sont pas bien apprises ou contiennent des séquences d'actions nouvelles ;
 - jugées dangereuses ou techniquement difficiles ;
 - les situations nécessitant la maîtrise d'une réponse habituelle et forte ou la résistance à une tentation.

(système attentionnel postérieur), et sensorielles, et la modulation top-down des régions pariétales et sensorielles via l'activation du système attentionnel antérieur. L'activation bottom-up des processus attentionnels repose, quant à elle, sur le système de projections noradrénergiques. Ces projections noradrénergiques issues du locus coeruleus vont innervier le thalamus et le cerveau antéro-basal.

II. Le contrôle attentionnel : diversité des mécanismes

1. Définition

Le contrôle attentionnel (ou contrôle cognitif) désigne un ensemble de mécanismes qui permettent la coordination des pensées et des actions pour mener à bien un comportement dirigé vers un but (Miller & Cohen, 2001). Cette composante attentionnelle est très liée à la distinction que l'on fait entre processus automatiques et processus contrôlés, dans le sens où un comportement automatique ne nécessite pas de contrôle attentionnel alors qu'un comportement contrôlé le requiert. Il ne s'agit cependant pas toujours d'un fonctionnement en tout ou rien : certains comportements ou situations vont nécessiter des degrés divers de contrôle attentionnel. Norman et Shallice (1986) ont défini cinq situations dans lesquelles les processus automatiques sont insuffisants, nécessitant donc la mise en œuvre du contrôle attentionnel pour optimiser les performances :

- les situations nécessitant la planification ou la prise de décision (ou sélection d'une action) ;
- les situations nécessitant la correction d'une erreur ou la détection d'un problème ;
- les situations dans lesquelles les réponses ne sont pas bien apprises ou contiennent des séquences d'actions nouvelles ;
- les situations jugées dangereuses ou techniquement difficiles ;
- les situations nécessitant la maîtrise d'une réponse habituelle et forte ou la résistance à une tentation.

Le **modèle du Système Attentionnel Superviseur (SAS)** proposé par ces auteurs permet de rendre compte des différents niveaux de contrôle de l'action (figure 6). Il intègre

la distinction entre comportement automatique et comportement contrôlé, établie en psychologie cognitive par Schneider et Shiffrin (1977). Ce modèle est schématisé de la façon suivante : au cœur du modèle se trouve la notion des schémas d'action (unités de contrôle de schémas ou de représentations de réponse). Un schéma d'action est un ensemble de structures de connaissances contrôlant des séquences d'action ou de pensées sur-apprises. Ces schémas d'action sont principalement activés via la perception, ne nécessitant alors que peu de contrôle attentionnel. Cependant, dans la plupart des situations, nos actions ne sont pas dictées exclusivement par une entrée. Lorsque plusieurs schémas d'action sont activés en même temps, un contrôle semi-automatique est nécessaire pour garantir la sélection adéquate des unités de contrôle appropriées. Cette résolution de conflit semi-automatique est assurée par le gestionnaire de conflits. Cependant, il ne permettra pas de gérer toutes les situations de la vie quotidienne : par exemple lorsqu'il s'agit d'aborder un problème nouveau pour lequel il n'existe pas de procédure de solution connue ou lorsqu'il faut faire face à une situation dangereuse. Dans ce cas, un contrôle attentionnel volontaire est requis. Cette fonction est attribuée au système attentionnel superviseur (SAS), qui va moduler le niveau d'activation des schémas d'action, et ainsi modifier les priorités d'action pour permettre au sujet d'adapter son comportement à la situation. L'activation de ces schémas est dans ce cas davantage guidée par un but. L'intervention du SAS s'impose dans les cinq situations décrites précédemment. Son rôle est de superviser l'activité du sujet, d'ordonner et de définir les priorités jusqu'à ce que le but soit atteint. Dans toutes ces situations nécessitant l'intervention du SAS, la motivation du sujet à atteindre son but va jouer un rôle déterminant.

2. Mécanismes cognitifs et neuronaux

Les mécanismes de contrôle attentionnel, qui englobent les processus de sélection, d'évaluation et d'inhibition de la réponse, le maintien de l'information en mémoire de travail, ou encore le traitement du conflit et des erreurs, ont été principalement associés à l'activité de deux régions cérébrales : le cortex préfrontal latéral et le cortex cingulaire

antérieur (Kerns, Cohen, MacDonald, Cho, Stenger, & Carter, 2004 ; MacDonald, Cohen, Stenger, & Carter, 2000). Les différents mécanismes de contrôle attentionnel ont des substrats neuronaux distincts au sein de ces régions frontales. Ainsi, le cortex préfrontal dorsolatéral gauche est impliqué dans la sélection de la réponse (Frith, Friston, Liddle, & Frackowiak, 1991), le cortex préfrontal dorsolatéral droit est associé à l'évaluation (monitoring) de la réponse (Cabeza, Locantore, & Anderson, 2003), et le cortex préfrontal ventrolatéral a un rôle central dans le maintien de l'information en mémoire de travail (Braver, Cohen, Nystrom, Jonides, Smith, & Noll, 1997). Une autre région du cortex préfrontal latéral, le gyrus frontal inférieur droit, a pour sa part été associée aux processus d'inhibition de la réponse (Aron, Robbins, & Poldrack, 2004 ; Chambers et al., 2006). Le cortex cingulaire antérieur est quant à lui impliqué dans la détection des conflits (perceptifs ou moteurs) et dans la détection des erreurs. Il a donc plus largement un rôle d'évaluation des besoins en contrôle attentionnel, ces besoins étant alors transmis aux régions préfrontales dont l'activation va permettre d'ajuster le comportement en cours pour résoudre les conflits ou corriger/prévenir les erreurs (Carter, Botvinick, & Cohen, 1999 ; Kerns et al., 2004 ; Matsumoto & Tanaka, 2004 ; van Veen, V., & Carter, C. S., 2006a).

Récemment, ces mécanismes ont été regroupés sur la base de leur dynamique temporelle dans le modèle « **Dual Mechanisms of Control** » (Braver, Gray, & Burgess, 2007). Le premier mode de contrôle défini est un mode proactif qui correspond à une activation continue, indépendante de la survenue d'évènements critiques (stimulus ou réponse). Ce mode proactif correspond au maintien actif et soutenu de l'objectif de la tâche. Le second mode est réactif et correspond quant à lui à un recrutement transitoire en réponse à un évènement critique (stimulus ou réponse). Le mode réactif renvoie aux processus de détection et de résolution du conflit, à la production des réponses adaptées, au monitoring des performances (bonnes réponses et erreurs). Ces spécificités en termes de dynamique temporelle se répercutent sur la quantité de ressources attentionnelles mobilisées par chacun d'entre eux : le mode proactif opérant de façon continue pour anticiper et prévenir les interférences est bien plus consommateur en ressources que ne l'est le mode réactif, qui est recruté de façon transitoire pour les détecter et les résoudre (Braver, 2012).

III. Mécanismes de contrôle attentionnel en situation d'attention soutenue : intérêt de l'approche électrophysiologique

En situation d'attention soutenue, comme dans de nombreuses autres activités ou tâches cognitives, l'utilisation conjointe des modes de contrôle proactif et réactif va être nécessaire au maintien de bonnes performances (Aron, 2011). Concrètement, dans cette situation, ces mécanismes de contrôle attentionnel vont permettre le maintien en mémoire de travail des objectifs de la tâche, l'évaluation (monitoring) des performances, l'inhibition des réponses dominantes ou compétitives, la régulation des pensées non liées à la tâche (vagabondage d'esprit), et l'augmentation du traitement sensoriel des stimuli cibles (Sarter & Paolone, 2011). Tous peuvent être activés de façon top-down ou bottom-up. La motivation joue notamment un rôle central dans la capacité à initier et à maintenir ces mécanismes. Sarter, Gehring, et Kozak (2006) ont ainsi proposé que la capacité d'un individu à déployer un effort attentionnel pour maintenir un bon niveau de performances au fil de la réalisation d'une tâche d'attention soutenue ne soit pas fonction des demandes imposées par la tâche, mais de sa motivation à rester engagé dans la tâche. Quelques études ont par exemple montré qu'une rémunération financière permettait le maintien des performances tout au long d'une longue tâche d'attention soutenue (60 minutes), une baisse de vigilance étant observée dans le groupe non rémunéré (Tompsonski & Tinsley, 1996). Plusieurs indicateurs comportementaux et de potentiels évoqués (event-related potentials, ERP) associés à ces deux modes de contrôle ont été identifiés. Pour les présenter, nous distinguerons les mécanismes de contrôle proactif, les mécanismes de contrôle réactif consécutifs à un stimulus, et les mécanismes de contrôle réactif consécutifs à une réponse. Si ces mécanismes ont été largement étudiés, comme nous le montrerons dans cette partie, ils l'ont en revanche très peu été en situation d'attention soutenue.

1. Mécanismes de contrôle proactif

En situation d'attention soutenue, le contrôle proactif renvoie au **maintien de l'objectif/de la consigne de la tâche**. La fréquence des stimuli cibles étant très faible, l'activation continue de ce contrôle va être nécessaire pour qu'une réponse adaptée puisse être donnée à leur apparition (Forster, Elizalde, Castle, & Bishop, 2011). D'un point de vue comportemental, l'adoption d'un mode de contrôle proactif est associée à un niveau de performances élevé en termes de précision (taux d'erreurs faible) et de rapidité (temps de réponse courts) (Czernochowski, Nessler, & Friedman, 2010). Au niveau électrophysiologique, un large composant ERP de polarité positive dans les régions frontales, et négative dans les régions pariétales, nommé **pre-stimulus slow wave**, a été associé au contrôle proactif. Cette pre-stimulus slow wave est évoquée par un indice informatif présenté avant le stimulus, et refléterait ainsi le maintien de la représentation du contexte (consignes) de la tâche (West, 2004 ; West & Schwarb, 2006). Ce composant est assez similaire à la contingent negative variation (CNV), un indicateur associé aux processus de préparation attentionnelle (van Boxtel & Böcker, 2004 ; Walter, Cooper, Aldridge, McCallum, & Winter, 1964). En effet, la CNV est évoquée par un signal indiquant au sujet la survenue du stimulus à traiter (demandant une réponse), et refléterait donc l'anticipation du stimulus et la préparation du mouvement. Il a notamment été montré que les amplitudes de la pre-stimulus slow wave et de la CNV sont plus larges avant une réponse correcte rapide comparativement à une réponse correcte lente (Brunia & Vingerhoets, 1980 ; West & Schwarb, 2006). Un autre composant, la late positive 1 (LP1), une modulation positive apparaissant dans les régions pariéto-centrales entre 550 et 800 msec après le stimulus, a quant à lui été associé à la réactivation des objectifs de la tâche suite à l'apparition d'un indice. L'amplitude de ce composant est plus large avant une réponse correcte comparativement à une erreur (Dockree, Kelly, Robertson, Reilly, & Foxe, 2005).

2. Mécanismes de contrôle réactif consécutifs à un stimulus

2.1. Allocation attentionnelle

Le premier de ces mécanismes réactifs activés suite à la présentation d'un stimulus va permettre l'allocation des ressources attentionnelles nécessaires à son traitement. Sur le plan électrophysiologique, la quantité de ressources mobilisée et allouée au traitement des stimuli peut être examinée à travers l'amplitude de deux composants ERP, la P3 et la P2.

L'amplitude et la latence du composant **P3**, une positivité apparaissant 300 à 500 msec après le stimulus au niveau centro-pariétal, sont le plus souvent considérées comme le reflet de la quantité de ressources attentionnelles allouée au traitement du stimulus (Isreal, Chesney, Wickens, & Donchin, 1980 ; Johnson, 1986 ; Polich, 1996 ; Wickens, Kramer, Vanasse, & Donchin, 1983). Il a par exemple été montré que l'amplitude de la P3 augmente avec le degré d'effort fourni par le sujet pour réaliser la tâche (Isreal et al., 1980). La P3 étant un indicateur de l'intensité du traitement attentionnel, son amplitude diminue et sa latence raccourcit lorsque la réalisation de la tâche devient de plus en plus automatique ; au contraire, l'augmentation de son amplitude et de sa latence au fil d'une tâche refléterait une mobilisation attentionnelle accrue (Hoffman, Simons, & Houck, 1983 ; Kok, 2001 ; Romero et Polich, 1996). Une seule étude a, à notre connaissance, examiné ce processus attentionnel en situation d'attention soutenue. Dans cette étude utilisant une tâche d'inhibition (de type Go/No-Go), l'amplitude de la P3 sur les stimuli non-critiques (Go) est restée stable tout au long de la tâche, suggérant que ces processus liés à l'allocation des ressources attentionnelles ne sont pas affectés par la durée de la tâche (Falkenstein, Hoormann, & Hohnsbein, 2002).

La **P2**, une positivité distribuée au niveau des régions frontales du scalp et atteignant son amplitude maximale entre 150 et 250 msec, bien que moins étudiée, a aussi été liée à l'allocation attentionnelle (Luck & Hillyard, 1994 ; Novak, Ritter, & Vaughan Jr, 1992 ; Potts & Tucker, 2001). Ce composant est plus précisément associé au traitement attentionnel des caractéristiques pertinentes des stimuli en regard des consignes de la tâche (Luck & Hillyard, 1994 ; Wild-Wall, Falkenstein, & Gajewski, 2012). Par exemple, Potts, Liotti, Tucker, & Posner

(1996) ont montré une large amplitude de ce composant après l'apparition de stimuli que le sujet avait pour consigne de détecter, mais une amplitude très réduite lorsque le sujet devait regarder ces stimuli de façon passive. Les études portant sur ce composant sont rares et aucune à notre connaissance ne s'est spécifiquement intéressée à l'étude de ce processus lié à l'allocation attentionnelle en situation d'attention soutenue.

2.2. Traitement du conflit : détection et résolution

Les autres mécanismes de contrôle réactif consécutifs à un stimulus et fortement sollicités en situation d'attention soutenue concernent le traitement du conflit, à savoir les étapes de détection et de résolution. Dans les tâches d'attention soutenue de type Go/No-Go (tâche d'inhibition), un conflit important va se produire à l'apparition des stimuli cibles No-Go, nécessitant une inhibition de la réponse. Le conflit renvoie à l'activation simultanée de plusieurs représentations de stimuli ou de réponses : il s'agit dans le premier cas d'un conflit au niveau de l'identification du stimulus (conflit perceptif), et dans le second cas d'un conflit au niveau de la production de la réponse (conflit moteur) (Botvinick, Braver, Barch, Carter, & Cohen 2001 ; van Veen, Cohen, Botvinick, Stenger, & Carter, 2001). Un conflit perceptif se produit par exemple lorsque les informations apportées par les stimuli sont incongruentes (dans la tâche de Stroop, par exemple quand le mot « rouge » est écrit en vert), alors qu'un conflit moteur se produit lorsque qu'une réponse fortement activée doit être inhibée ou remplacée par une autre réponse.

Sur le plan électrophysiologique, la **détection du conflit** a été associée à deux composants ERP : la **N2** et la **N450**. La N2 est une négativité apparaissant 150 à 250 msec après le stimulus au niveau fronto-central. Ce composant serait le corrélat électrophysiologique de la détection d'un conflit. En effet, l'amplitude de la N2 est plus large après la présentation d'un stimulus conflictuel (perceptif ou moteur) comparativement à un stimulus non-conflictuel (Folstein & Van Petten, 2008 ; van Veen & Carter, 2002 ; Yeung, Botvinick, & Cohen, 2004). Falkenstein, Hoormann, et Hohnsbein (1999) ont par ailleurs montré dans une tâche d'inhibition que l'amplitude de la N2 était réduite et sa latence augmentée chez des sujets faisant beaucoup d'erreurs comparativement à des sujets faisant

peu d'erreurs, suggérant un lien entre cette étape de détection du conflit et l'efficacité des processus d'inhibition mis en jeu pour le résoudre. Une autre négativité, la N450 ou MFN (medial frontal negativity), apparaissant en moyenne 450 msec après le stimulus et partageant les mêmes caractéristiques topographiques que la N2, a aussi été interprétée comme le reflet d'un processus de détection du conflit (West, 2003 ; West & Alain, 2000a). Ce composant n'a à notre connaissance été étudié que dans des tâches de Stroop, dans lesquelles le conflit est de type perceptif (manipulation de la congruence entre le nom de couleur et la couleur du mot). Dans ces tâches, la N450/MFN est plus ample après la présentation d'un stimulus incongruent (conflictuel) qu'après un stimulus congruent (non-conflictuel).

La **résolution du conflit**, qui selon le type de tâche peut correspondre à la sélection de la bonne réponse ou à l'activation des processus d'inhibition, a été associée à deux composants ERP : la **P3** et le **sustained potential (SP)**. En effet, la P3 est typiquement plus ample après la présentation d'un stimulus conflictuel comparativement à un stimulus non-conflictuel (Falkenstein et al., 1999 ; Pfefferbaum & Ford, 1988). Des études utilisant des tâches d'inhibition (conflit moteur) suggèrent que la P3 évoquée par les stimuli conflictuels refléterait des processus différents en fonction de sa topographie : au niveau pariétal, elle aurait un rôle d'évaluation, alors qu'au niveau frontal, elle a été interprétée comme le reflet du processus d'inhibition lui-même, ou bien comme le reflet de l'évaluation a posteriori de l'efficacité de ce processus (Falkenstein, Koshlykova, Kiroj, Hoormann, & Hohsbein, 1995 ; Nasman & Rosenfeld, 1990 ; Pfefferbaum, Ford, Weller, & Kopell, 1985 ; Vallesi, 2011 ; Vallesi & Stuss, 2010). Le sustained potential (SP), une positivité de topographie centro-pariétale et apparaissant 500 msec après le stimulus, a également été associé à la résolution du conflit dans les tâches de Stroop (West, Jakubek, Wymbs, Perry, & Moore, 2005). En effet, cette positivité est plus ample après l'apparition de stimuli incongruents (conflictuels) comparativement aux stimuli congruents (non-conflictuels).

Seules quelques rares études se sont intéressées à ces mécanismes en situation d'attention soutenue, afin d'évaluer leur préservation ou altération au fil de la tâche. Concernant la détection du conflit, certaines études montrent une détérioration qui se traduit par une diminution de l'amplitude de la N2 (Boksem, Meijman, & Lorist, 2006) et une

augmentation de sa latence au fil de la tâche (Kato, Endo, & Kizuka, 2009). Dans l'étude de Boksem et al. (2006), cette diminution de l'amplitude de la N2 (sur les stimuli incongruents) a été interprétée comme l'indicateur d'une détection réduite au fil de la tâche du conflit évoqué par les stimuli incongruents (conflictuels). Cet effet délétère de la durée de la tâche sur les mécanismes de détection de conflit ne s'est toutefois pas répercuté sur la précision (stabilité du taux d'erreurs sur les stimuli conflictuels au fil du temps), mais sur la vitesse de réponse (augmentation des temps de réponse au fil du temps), ce ralentissement étant interprété par les auteurs comme la mise en place d'une stratégie visant à compenser l'altération des processus de détection du conflit. Une autre étude n'a cependant observé aucun effet de la durée de la tâche sur ces processus (Falkenstein et al., 2002). Les résultats sont également contrastés en ce qui concerne la résolution du conflit. Certaines études mettent en évidence une altération de ces processus, qui se traduit par une diminution de l'amplitude de la P3 (Kato et al., 2009) et une augmentation de la latence de ce composant au fil de la tâche (Boksem et al., 2006 ; Kato et al., 2009). Dans l'étude de Kato et al. (2009) utilisant une tâche d'inhibition, ces effets ont été interprétés comme le reflet d'une altération au fil de la tâche des processus associés à l'inhibition de la réponse, se traduisant au niveau comportemental par une augmentation du taux d'erreurs au fil de la tâche. Deux autres études n'ont à l'inverse montré aucun effet de la durée de la tâche sur les processus de résolution du conflit (Falkenstein et al., 2002 ; Lorist, Boksem, & Ridderinkhof, 2005).

3. Mécanismes de contrôle réactif consécutifs à une réponse

Pour finir, les mécanismes de contrôle réactif consécutifs à la réponse et correspondant à l'évaluation constante de ses propres performances (monitoring) jouent eux aussi un rôle essentiel en situation d'attention soutenue. En effet, la détection d'une erreur va par exemple signaler un besoin accru en contrôle attentionnel, et ainsi permettre de prévenir de futures erreurs.

D'un point de vue comportemental, plusieurs indicateurs témoignent de l'augmentation du contrôle suite à une erreur : l'amélioration de la précision et/ou le

ralentissement sur l'essai consécutif (Danielmeier & Ullsperger, 2011 ; Eichele, Juvodden, Ullsperger, & Eichele, 2010 ; King, Korb, Von Cramon, & Ullsperger, 2010 ; Marco-Pallares, Camara, Münte, & Rodríguez-Fornells, 2008). En effet, après une erreur, le sujet va généralement répondre plus lentement sur les essais suivants (Rabbitt, 1966). Ce phénomène est connu sous le nom de « ralentissement post-erreur » (post-erreur slowing, Rabbitt, 1966 ; Debener, Ullsperger, Siegel, Fiehler, Von Cramon, & Engel, 2005). Trois grandes interprétations de cet ajustement comportemental ont été proposées : une augmentation compensatoire du contrôle attentionnel suite à une erreur (Gehring & Fencsik, 2001 ; Ridderinkhof, Ullsperger, Crone, & Nieuwenhuis, 2004), une augmentation de l'activité des processus d'inhibition de la réponse suite à une erreur (Marco-Pallares et al., 2008), ou encore une réorientation attentionnelle vers l'erreur (Notebaert, Houtman, Opstal, Gevers, Fias, & Verguts, 2009).

Au niveau électrophysiologique, plusieurs indicateurs consécutifs à la réponse ont été identifiés : la « négativité liée à l'erreur » (« Error-Related Negativity », ERN), la « positivité d'erreur » (« error Positivity », Pe), et la « négativité liée à la réponse correcte » (« Correct Response Negativity », CRN). L'**ERN** est un composant négatif dont l'amplitude est maximale 50 à 100 msec après une erreur (Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke 1990 ; Gehring, Goss, Coles, Meyer, & Donchin, 1993). Sa latence précoce suggère qu'il s'agit d'un mécanisme de détection automatique, indépendant d'un traitement conscient de l'erreur. En effet, Falkenstein, Hoormann, Christ, et Hohnsbein (2000) ont proposé que l'ERN reflète un mécanisme de détection rapide et pré-conscient de l'erreur, basé sur la comparaison entre la réponse effectuée et la réponse requise. Des études ont mis en évidence le lien entre l'amplitude de l'ERN et les ajustements compensatoires. Gehring et al. (1993) ont par exemple montré que l'amplitude de l'ERN était corrélée avec la probabilité de donner une réponse correcte immédiatement après l'erreur et avec le ralentissement post-erreur. D'autres auteurs ont cependant proposé que l'ERN reflète plutôt des processus de contrôle sensibles à des conflits de réponse (Carter, Braver, Barch, Botvinick, Noll, & Cohen, 1998) ou à des changements dans la probabilité d'obtenir une récompense (Holroyd & Coles, 2002). Malgré l'absence de consensus sur la signification fonctionnelle de ce composant, l'ERN va dans tous les cas agir comme le signal d'un besoin d'ajustement (Ridderinkhof et al., 2004).

Un autre composant ERP évoqué par l'erreur est la **Pe**, un composant positif assez tardif présent entre 200 et 500 msec après une erreur (Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke, 1991). Sa latence tardive suggère qu'il s'agit d'un mécanisme de prise de conscience de l'erreur (Ullsperger, Harsay, Wessel, & Ridderinkhof, 2010). De nombreux travaux ont montré que la Pe est présente seulement suite à des erreurs détectées consciemment par le sujet, et qu'elle n'apparaît pas suite à une erreur dont le sujet n'est pas conscient (Nieuwenhuis, Ridderinkhof, Blom, Band, & Kok, 2001 ; O'Connell et al., 2007 ; Shalgi, Barkan, & Deouell, 2009). L'amplitude de la Pe a par ailleurs été corrélée au ralentissement post-erreur (Hajcak, McDonald, & Simons, 2003). Cependant, d'autres hypothèses ont été émises quant à la signification de la Pe. Une théorie basée sur la ressemblance entre la Pe et la P3 propose que la Pe reflète un traitement attentionnel de l'erreur (Mathewson, Dywan, & Segalowitz, 2005). Il a aussi été postulé que la Pe reflète une évaluation affective de l'erreur et de ses conséquences (van Veen & Carter, 2002). Un composant ERP est aussi observé suite à une réponse correcte, la **CRN**, qui a une topographie similaire à l'ERN mais une amplitude plus réduite (Falkenstein et al., 2000 ; Ford, 1999 ; Vidal, Hasbroucq, Grapperon, & Bonnet, 2000). Si la CRN est également considérée comme le corrélât électrophysiologique d'un contrôle consécutif à la réponse (correcte), la question de sa signification fonctionnelle reste entière : certains auteurs proposent que l'ERN et la CRN reflètent un processus de contrôle commun, actif pour tout type de réponse mais augmenté suite à une erreur (Falkenstein et al., 2000 ; Hoffmann & Falkenstein, 2011 ; Roger, Bénar, Vidal, Hasbroucq, & Burle 2010 ; Vidal et al., 2000), tandis que d'autres proposent que ces deux composants reflètent des processus de contrôle distincts, l'un spécifique à l'erreur et l'autre indépendant du type de réponse (Endrass, Klawohn, Gruetzmann, Ischebeck, & Kathmann, 2012 ; Yordanova, Falkenstein, Hohnsbein, & Kolev, 2004).

Là encore, peu d'études se sont intéressées à ces processus de monitoring en situation d'attention soutenue. Quelques données ont montré que la baisse de vigilance s'accompagnait d'une diminution de l'amplitude de l'ERN au fil de la tâche (Lorist et al., 2005 ; Boksem et al., 2006 ; Kato et al., 2009) et de l'amplitude de la CRN (Bonfond, Doignon-Camus, Hoeft, & Dufour, 2011). Cet effet a pu être observé avec des tâches de nature différente, comme par exemple une tâche d'interférence (« flanker task ») de deux

heures (Lorist et al., 2005) et une tâche d'inhibition motrice de 60 minutes (Kato et al., 2009). Par contre, aucun effet sur la latence de l'ERN n'a été observé dans ces études. L'atténuation de l'amplitude de l'ERN et de la CRN au fil de la tâche semble indiquer une détérioration des mécanismes de détection de l'erreur et de la réponse correcte avec la durée de la tâche. Une disparition progressive des ajustements de performances suite à l'erreur est observée conjointement à la diminution de l'amplitude de l'ERN (Boksem et al., 2006 ; Lorist et al., 2005) : alors qu'en début de tâche, les sujets répondent plus lentement après avoir commis une erreur, ou corrigent immédiatement leurs erreurs en exécutant la bonne réponse, ces ajustements post-erreur sont de moins en moins fréquents en fin de tâche. Pris ensemble, ces résultats mettent donc en évidence une altération au fil de la tâche des mécanismes de contrôle réactif consécutifs à la réponse.

Chapitre 2 : Attention soutenue et contrôle attentionnel dans le vieillessement normal

Le vieillissement normal s'accompagne d'un ensemble de déficits cognitifs, les plus notables étant les déficits de mémoire de travail, de mémoire épisodique, de résolution de problème, ou encore des capacités visuo-spatiales (voir Hedden & Gabrieli, 2004 pour une revue). En ce qui concerne les effets du vieillissement normal sur l'attention, les études qui ont examiné les composantes de sélection et de contrôle au sein d'un même paradigme ont montré que les individus âgés sont généralement ralentis mais présentent des capacités préservées (Folk & Hoyer, 1992 ; Jennings, Dagenbach, Engle, & Funke, 2007 ; Mahoney, Verghese, Goldin, Lipton, & Holtzer, 2010). Beaucoup moins d'études se sont intéressées aux effets du vieillissement normal sur l'attention soutenue, et ont mis en évidence des résultats contradictoires. Nous décrivons ces résultats dans la première partie de ce chapitre (I), et nous nous intéresserons dans une seconde partie aux effets du vieillissement sur les différents mécanismes de contrôle attentionnel sollicités en situation d'attention soutenue (II).

I. Effet de l'âge sur les capacités d'attention soutenue : des résultats contradictoires

Les effets du vieillissement normal sur les capacités d'attention soutenue ont été étudiés par le biais des deux approches décrites dans le premier chapitre : la grande majorité des études a utilisé des tâches de détection, et seules quelques études récentes ont eu recours à des tâches d'inhibition. Une revue de la littérature concernant les effets de l'âge sur les capacités d'attention soutenue a mis en évidence des résultats contradictoires en fonction de l'approche utilisée, certaines études rapportant une détérioration de cette capacité avec l'âge, d'autres une préservation voire une amélioration (Staub, Daignon-Camus, Després, & Bonnefond, 2013, présentée à la suite de ce chapitre). Dans cette revue, nous avons donc distingué les études utilisant l'une ou l'autre approche, et restitué les caractéristiques des tâches utilisées ainsi que les résultats rapportés par chacune de ces études.

Study	Task	Duration	Age Range	Overall vigilance	Vigilance decrement
Berardi et al., 2001	Detection of digit 0 among digits 1 to 9 (6 levels of stimulus quality)	8,1 min for each level of degradation	Y=20-39 (n=21) MA=40-59 (n=21) O=60-73 (n=20)	Hit: O=Y FA: O=Y RT: O=Y	Yes O=Y
Bunce & Sisa, 2002	Detection of digit 0 among digits 1 to 9 (1 level of stimulus quality)	9 min	Y=16-35 (n=26) O=45-65 (n=26)	Hit: O=Y FA: O=Y RT: O=Y	Yes O=Y
Bunce, 2001	Detection of digit 0 among digits 1 to 9 (3 levels of stimulus quality)	10 min. for each condition	Y=21-30 (n=24) O=61-83 (n=24)	RT: O>Y	Yes O>Y
Davies & Griew, 1963	Auditory vigilance task (detection of 3 consecutive odd digits)	75 min	Y=17-29 (n=15) O=41-58 (n=15)	Hit: O=Y FA: O=Y	No
Davies & Davies, 1975 (experiment 2)	X-Continuous Performance Task	20 min	Y=18-31 (n=40) O=65-72 (n=40)	Hits: O<Y	-
Deaton & Parasuraman, 1993	Digit discrimination task (2 versions: sensory & cognitive)	32,4 min	Y=18-29 (n=20) MA=40-55 (n=20) O=65-85 (n=20)	Hit: O<Y FA: O>Y	Yes O>Y (in the sensory version only)
Filley & Cullum, 1994 (study 2)	Numerical Attention Test (digit cancellation task)	-	Y=50-69 (n=20) O=70-79 (n=18)	FA: O=Y RT: O>Y (i.e. time to complete the task)	-
Giambra & Quilter, 1988	Mackworth's clock test	60 min	18 to 91 (3 cross-sectional samples for a total of n=478, longitudinal sample of n=53)	Hits: O=Y RT: O>Y	Yes O=Y
Giambra, 1997	Detection of 17x17mm squares among 20x20mm neutral squares	30 min	Y=18-44 (n=146) MA=45-59 (n=143) O=60-85 (n=176)	Hit: O=Y FA: O>Y	Yes O=Y
Gridley & Gilmore, 1986	Nonverbal auditory test (detection of a specific tone)	40 min	Y=19-34 (n=20) O=62-79 (n=20)	Hit: O=Y RT: O>Y	No
Griew & Davies, 1962 (experiment 3)	Auditory vigilance task (detection of 3 consecutive odd digits)	40 min	Y=18-31 (n=12) O=44-61 (n=12)	Hit: O=Y FA: O=Y	No
Harkins et al., 1974	Odd-even numbers task (paced inspection task)	10,2 min	Y=18-25 (n=41) MA to O=46-72 (n=317)	Hits: O<Y FA: O>Y Om: O>Y	Yes O>Y (decrease in hit rate) O=Y (increase in RT)

détérioration préservation détérioration/préservation amélioration

Tableau 1. Récapitulatif des résultats principaux des études utilisant des tâches de détection (adapté de Staub et al., 2013) (suite au verso de la page 23).

FA = false alarms, O = older adults, Om = omissions, MA = middle-aged, RT = reaction time, Y = young adults.

1. Tâches de détection : répondre à des stimuli cibles rares

Nous avons recensé 23 études ayant utilisé des tâches de détection pour évaluer les capacités d'attention soutenue dans le cadre du vieillissement (tableau 1). Dans cette approche, l'attention soutenue est définie comme un état de préparation à détecter et à répondre à certains changements de l'environnement apparaissant à des intervalles de temps aléatoires. La moitié de ces études a été réalisée entre 1962 et 1986, et l'autre moitié entre 1987 et 2005. Il s'agit exclusivement d'études comportementales dans lesquelles la baisse de vigilance (analyse du décours temporel des performances) et/ou le niveau de vigilance global (analyse des performances sur l'ensemble de la tâche) ont été utilisés comme indicateurs des capacités d'attention soutenue. Les mesures de performances utilisées varient aussi selon les études, certaines considérant uniquement la précision (détections correctes, fausses alarmes, omissions), d'autres la rapidité (temps de réponse), ou bien les deux. Si toutes ces tâches demandent aux sujets de détecter des cibles apparaissant peu fréquemment, elles présentent cependant de nombreuses différences, tant dans leur durée (de 150 secondes à 2 heures) que dans la nature des stimuli (auditifs, visuels) ou de leurs caractéristiques (fréquence d'apparition, niveau de dégradation, etc.). Cette hétérogénéité rend la comparaison de ces différentes études d'autant plus difficile, et contribue certainement à expliquer l'absence de réponse claire à la question de la préservation ou de l'altération des capacités d'attention soutenue dans le cadre du vieillissement normal.

1.1. Détérioration

Parmi ces 23 études, 11 d'entre elles ont mis en évidence une détérioration des capacités d'attention soutenue avec l'âge. En effet, elles montrent des déficits chez les seniors et ce quel que soit l'indicateur de performances considéré. Dans un certain nombre de ces études, la baisse de vigilance est plus importante chez les sujets âgés que chez les jeunes (détérioration des performances plus rapide ou plus prononcée), et le niveau de

Study	Task	Duration	Age Range	Overall vigilance	Vigilance decrement
Mani et al., 2005	A-X-Continuous Performance Task	150 sec	19-82 (n=32)	FA: O>Y Om: O>Y	-
Mouloua & Parasuraman, 1995	Letter detection task (high & low event rate; high, moderate & low level of spatial uncertainty)	30 min	Y=18-24 (n=36) O=60-74 (n=36)	Hit: O<Y	Yes O>Y
Neal & Pearson, 1966	2 auditory vigilance tasks: -detection of 3 consecutive odd digits - detection of a specific tone	64 min 60 min	Y=21-30 (n=16) O=39-62 (n=8)	Hit: O=Y FA: O=Y	No
Parasuraman & Giambra, 1991	Detection of 17x17mm squares among 20x20mm neutral squares (high and low event rate)	30 min	Y=19-27 (n=12) MA=40-55 (n=12) O=70-90 (n=12)	Hit: O<Y FA: O>Y	Yes O>Y
Parasuraman et al., 1989	Detection of digit 0 among digits 1 to 9 (3 levels of stimulus quality)	8 min	Y=21-29 (n=20) O=65-75 (n=20)	Hit: O<Y FA: O>Y	Yes O>Y
Surwillo & Quilter, 1964	Mackworth's clock test	60 min	22-82 (mean Y=43,7 (n=53), mean O=71(n=53))	Hit: O<Y RT: Y=O	Yes O>Y
Talland, 1966	Detection of a specific numeral (high, medium & low event rate)	3 experiments of 30, 36 and 48 min	20-69 (n=40 in each of the 5 decades)	Hit: O<Y FA: O≥Y (at the fastest rate)	-
Thackray & Touchstone, 1981	Simulated air traffic control task with alphanumeric symbols	120 min	Y=18-29 (n=15) MA=40-50 (n=15) O=60-70 (n=15)	FA: O>Y Om: O>Y RT: O>Y	Yes O>Y
Thompson et al., 1963	Odd-even numbers task (inter-stimulus interval of 1, 2 or 4 sec)	5 min	Y=18-35 (n=30) O=60-75 (n=25)	Hit: O<Y at the fastest speed	-
Tomporowki & Tinsley, 1996 (experiment 2)	Visual continuous digit-matching vigilance test	60 min	Y=18-20 (n=15) O=61-79 (n=15)	Hit: O>Y FA: O=Y	No
Tune, 1966	Detection of 3 consecutive odd digits (among series of 10 digits that are followed by 10 sec. silence)	40 min	mean Y=36,8 (n=20) mean O=65,6 (n=20)	Hit: O=Y FA: O>Y	-

détérioration préservation détérioration/préservation amélioration

Tableau 1. (suite).

FA = false alarms, O = older adults, Om = omissions, MA = middle-aged, RT = reaction time, Y = young adults.

vigilance global est diminué chez les seniors. Ces résultats ont été obtenus dans des tâches de détection ou de discrimination assez différents : détecter un petit carré parmi des carrés légèrement plus grands (30 minutes ; Parasuraman & Giambra, 1991), détecter une différence de taille entre des paires de chiffres (32.4 minutes ; Deaton & Parasuraman, 1993), ou encore signaler, dans une simulation de contrôle aérien de 2 heures, le dépassement d'une certaine valeur de seuil (Thackray & Touchstone, 1981). Les autres études montrent aussi que la manipulation de certaines caractéristiques des stimuli (e.g. dégradation des stimuli ou augmentation de la fréquence de présentation des stimuli) a comme effet d'accentuer la détérioration des capacités d'attention soutenue des seniors. Par exemple, dans une tâche de détection visuelle durant moins de 10 minutes dans laquelle le sujet doit détecter le chiffre cible 0 parmi des chiffres non-cibles allant de 1 à 9, la baisse de vigilance des participants âgés était plus importante quand les stimuli étaient dégradés (Bunce, 2001 ; Parasuraman, Nestor, Greenwood, 1989). De la même façon, lorsque la fréquence de présentation des stimuli (i.e. nombre de stimuli par minute) est élevée, les performances d'attention soutenue des sujets âgés se détériorent aussi de façon plus importante (Mouloua & Parasuraman, 1995 ; Parasuraman & Giambra, 1991 ; Talland, 1966 ; Thompson, Opton Jr, & Cohen, 1963). Deux éléments peuvent expliquer la détérioration des capacités d'attention soutenue chez les individus âgés. Tout d'abord, dans la mesure où la saillance perceptive des stimuli peut suffire à entraîner une activation bottom-up des processus attentionnels dans ces tâches de détection (Sarter et al., 2001), la baisse de l'efficacité des traitements perceptifs et sensoriels avec l'âge pourrait causer une altération de ce déclenchement bottom-up chez les seniors (Baltes & Lindenberger, 1997). Cette interprétation va notamment dans le sens de la théorie proposant qu'une part importante des déficits présentés par les seniors dans diverses capacités cognitives pourrait s'expliquer par la détérioration du fonctionnement sensoriel inhérente au vieillissement (Lindenberger & Baltes, 1994). Par ailleurs, l'effet particulièrement délétère de la manipulation de certaines caractéristiques des stimuli chez les individus âgés pourrait s'expliquer par la quantité de ressources plus limitée dont ils disposeraient, et qui s'épuiserait plus rapidement dans des conditions fortement consommatrices en ressources attentionnelles (Craik & Byrd, 1982 ; Park, 2000 ; Reuter-Lorenz & Lustig, 2005).

1.2. Préservation

A l'inverse, six études montrent une préservation des capacités d'attention soutenue avec l'âge. Plus précisément, elles mettent en évidence une baisse de vigilance ou un niveau global de vigilance comparable entre les participants jeunes et âgés. Par exemple, dans trois études utilisant des tâches de détection auditives (détecter les occasions où trois nombres impairs sont présentés consécutivement pendant une durée de 40 à 75 minutes), les individus âgés ne différaient pas des jeunes du point de vue du niveau de vigilance global (Davies & Griew, 1963 ; Griew & Davies, 1962 - expérience 3 ; Neal & Pearson, 1966). La préservation des capacités d'attention soutenue chez les seniors dans ces tâches auditives pourrait précisément tenir à leur nature. En effet, dans les tâches visuelles, la détection du stimulus nécessite parfois sa localisation spatiale, une capacité souvent altérée dans le cadre du vieillissement (Davies & Griew, 1963 ; Faulkner, 1962). L'absence de cette contrainte de localisation dans les tâches auditives pourrait par conséquent contribuer à expliquer la préservation des capacités d'attention soutenue chez les seniors mise en évidence dans ce type de tâches. Soulignons également la mise en évidence du même effet de l'âge avec des tâches de détection visuelles (Berardi, Parasuraman, & Haxby, 2001 ; Bunce & Sisa, 2002), dans lesquelles le niveau de dégradation des stimuli était manipulé. Ces résultats en contradiction avec les études mentionnées précédemment peuvent peut-être être liés à la durée relativement courte des tâches utilisées (8 à 9 minutes), ne permettant pas d'évaluer à plus long terme la capacité des sujets âgés à maintenir leur attention.

1.3. Détérioration/préservation

Enfin, les six dernières études font état de résultats plus contrastés concernant les capacités d'attention soutenue des sujets âgés. Selon les indicateurs considérés, les résultats indiquent une détérioration ou plutôt une préservation. Il a par exemple été montré, dans une étude utilisant la tâche de l'horloge de Mackworth durant une heure (Giambra & Quilter, 1988) et dans une tâche de détection auditive de 40 minutes (Gridley, Mack, & Gilmore, 1986), que les sujets âgés avaient des temps de réaction plus longs que les sujets

Study	Task	Duration	Age Range	Overall vigilance	Vigilance decrement
Brache et al., 2010	"Industrial inspection" task (press to "good" parts and inhibit response to "bad" parts)	50 min	Y=18-33 (n=18) O=55-70 (n=17)	FA: O<Y RT: O>Y	Y only
Carriere et al., 2010	SART	22 min	14-77 (n=638)	FA: O<Y Om: O<Y RT: O>Y	-
Jackson & Balota, 2011 (experiment 3)	SART	22 min	mean Y=20,9 (n=31) mean O=76,3 (n=49)	FA: O<Y RT: O>Y	-
McAvinue et al., 2012	SART	5,4 min	Y=20s/30s (n=28) O=60s/70s (n=27)	FA: O>Y Om: O>Y RT: O>Y	-
McVay et al., 2013	SART	20 min	Y=18-28 (n=108) O=60-75 (n=99)	FA: O<Y RT: O>Y	

détérioration préservation détérioration/préservation amélioration

Tableau 2. Récapitulatif des résultats principaux des études utilisant des tâches d'inhibition (adapté de Staub et al., 2013).

FA = false alarms, O = older adults, Om = omissions, MA = middle-aged, RT = reaction time, Y = young adults.

jeunes, mais qu'ils présentaient un taux de détection global comparable à celui des jeunes. Deux autres études, l'une utilisant une tâche de détection visuelle de 30 minutes (Giambra, 1997), et l'autre utilisant une tâche de détection auditive de 40 minutes (Tune, 1966), ont aussi mis en évidence un taux de détection comparable entre les deux groupes d'âge, mais un nombre plus important de fausses alarmes chez les sujets âgés (au fil de la tâche dans la première étude, de façon globale dans la seconde).

2. Tâches d'inhibition : inhiber un comportement en cours

Nous n'avons recensé que cinq études, réalisées entre 2010 et 2013, qui ont utilisé des tâches d'inhibition pour examiner les effets du vieillissement normal sur les capacités d'attention soutenue, la SART étant la tâche la plus utilisée (tableau 2). Dans cette approche, l'attention est définie comme la capacité à inhiber une réponse bien apprise à de rares occasions, et ces quelques études font globalement état d'une préservation voire d'une amélioration de cette capacité avec l'âge. Les erreurs d'inhibition constituent dans toutes ces études l'indicateur des capacités d'attention soutenue des sujets (analyse globale ou décours temporel).

Parmi ces cinq études, une seule a montré une détérioration des capacités d'attention soutenue avec l'âge : dans une SART de 5 minutes, les participants âgés présentaient un taux globalement plus important d'erreurs d'inhibition et d'omissions, et des temps de réponse plus longs que les sujets jeunes (McAvinue et al., 2012). A l'inverse, trois études utilisant la même tâche mais d'une durée plus longue (20 min environ) ont montré que les sujets âgés commettaient globalement moins d'erreurs d'inhibition que les jeunes (Carriere, Cheyne, Solman, & Smilek, 2010 ; Jackson & Balota, 2012 ; McVay, Meier, Touron, & Kane, 2013), mais qu'ils répondaient plus lentement. La dernière étude, enfin, qui est la seule à avoir examiné le décours temporel des performances, a mis en évidence un meilleur maintien des performances au fil de la tâche chez les sujets âgés (Brache, Scialfa, & Hudson, 2010). Dans cette étude, les auteurs ont utilisé une tâche de 50 minutes simulant une inspection industrielle, dans laquelle les sujets devaient répondre à l'apparition

fréquente de « bonnes » pièces (trois cercles équidistants) et inhiber plus rarement leur réponse à l'apparition moins fréquente de « mauvaises » pièces (avec le cercle du milieu décentré). Les auteurs ont observé que le groupe de sujets âgés faisait globalement moins d'erreurs d'inhibition que les sujets jeunes et maintenait ce taux à un niveau stable tout au long de la tâche, tandis que les sujets jeunes présentaient à l'inverse une baisse de vigilance.

Ces résultats montrant majoritairement des capacités d'attention soutenue préservées chez les seniors dans les tâches d'inhibition peuvent tout d'abord être mis en lien avec les données montrant que les processus d'inhibition motrice sollicités dans des paradigmes de Go/No-Go (indépendamment d'une situation d'attention soutenue) ne sont pas altérés dans le cadre du vieillissement (Grandjean & Collette, 2011 ; Rush, Barch, & Braver, 2006). De plus, la mise en évidence chez les seniors de temps de réponse plus lents associés à bonnes performances (Carriere et al., 2010 ; Jackson & Balota, 2012 ; McVay et al., 2013), suggère l'adoption d'une stratégie de réponse privilégiant la précision à la rapidité. Dans le même ordre d'idée, l'une de ces études indique que le ralentissement post-erreur (ralentissement de la vitesse de réponse suite à une erreur) était aussi plus prononcé chez les individus âgés comparativement aux jeunes (Jackson & Balota, 2012). Ces effets de l'âge ont déjà été mis en évidence dans d'autres types de tâches, et interprétés comme le signe d'un engagement accru du contrôle attentionnel chez les individus âgés (Band & Kok, 2000, Endrass, Schreiber, & Kathmann, 2012 ; Falkenstein, Hoormann, & Hohnsbein, 2001 ; Hoffmann & Falkenstein, 2011). Cette interprétation est notamment en accord avec des résultats issus d'études d'imagerie montrant une activation plus importante chez les seniors de certaines régions cérébrales sous-tendant précisément les mécanismes de contrôle attentionnel (le cortex cingulaire antérieur et l'aire motrice pré-supplémentaire) (Hester, Fassbender, & Garavan, 2004 ; Nielson, Langenecker, & Garavan., 2002). Ainsi, la préservation des capacités d'attention soutenue mise en évidence dans la majorité des études utilisant des tâches d'inhibition pourrait s'expliquer par une plus forte mobilisation des mécanismes de contrôle cognitif chez les individus âgés comparativement aux sujets jeunes.

L'hétérogénéité de ces résultats pourrait être expliquée par la demande imposée par l'une et l'autre approche en termes de contrôle attentionnel. En effet, la bonne réalisation des tâches de détection (TFT) va reposer sur l'activation de processus automatiques (ne requérant donc peu ou pas de contrôle) alors que celle des tâches d'inhibition (Go/No-Go) va au contraire nécessiter l'activation soutenue des mécanismes de contrôle attentionnel (Manly et al., 1999). Ainsi, ces effets différenciés de l'âge sur les capacités d'attention soutenue en fonction de l'approche utilisée pourraient être liés à une utilisation différente au cours du vieillissement des processus automatiques et contrôlés. Que sait-on justement des effets du vieillissement normal sur ces mécanismes de contrôle attentionnel ?

II. Effets de l'âge sur les mécanismes de contrôle attentionnel

De nombreuses données issues de la littérature sur le vieillissement cognitif soutiennent l'idée qu'en raison du déclin fonctionnel des régions frontales avec l'âge, les seniors vont présenter des difficultés importantes dans des tâches sollicitant fortement les mécanismes de contrôle attentionnel, dont l'activation est précisément sous-tendue par ces régions frontales (Braver & West, 2008 ; Fabiani, Friedman, & Cheng, 1998 ; West, 1996). Néanmoins, les études ayant examiné les effets du vieillissement sur les différents mécanismes de contrôle sollicités lors d'une tâche d'attention soutenue montrent des résultats plus nuancés, souvent mis en lien avec le niveau de motivation globalement plus élevé chez les seniors. En effet, la motivation joue un rôle déterminant dans la capacité à initier et à maintenir un certain niveau de contrôle attentionnel en situation d'attention soutenue. Tomporowski et Tinsley (1996) ont par exemple examiné l'effet d'une récompense monétaire sur les performances d'attention soutenue de sujets jeunes et âgés dans une tâche de 60 minutes. Dans leur première expérience, ils ont montré que des sujets jeunes et âgés rémunérés pour leur participation avaient de meilleures performances que des sujets jeunes non-rémunérés. Dans une deuxième étape où aucun des deux groupes d'âge ne recevait de rémunération, les auteurs ont observé une baisse de vigilance chez les jeunes, mais une stabilité des performances chez les âgés, alors même que la complexité de

la tâche avait été augmentée. Alors que les sujets jeunes sont plus sensibles à des formes de motivation extrinsèque (liée à l'attente d'une récompense, ou à l'évitement d'une punition), les individus âgés présentent un niveau élevé de motivation intrinsèque (existant par elle-même, non liée à l'attente d'une récompense). Cette motivation plus forte va se traduire par un effort accru pour réaliser la tâche et une meilleure capacité à inhiber les pensées non liées à la tâche (Giambra, 1989 ; Grodsky & Giambra, 1990–1991 ; Jackson & Balota, 2012 ; Krawietz, Tamplin, & Radvansky, 2012 ; McVay et al., 2013 ; Vallerand, O'Connor, & Hamel, 1995). Dans cette partie, nous décrirons donc les études qui se sont intéressées aux effets du vieillissement sur les différents mécanismes de contrôle, à savoir les mécanismes de contrôle proactif (1), les mécanismes de contrôle réactif consécutifs au stimulus (2), et les mécanismes de contrôle réactif consécutifs à la réponse (3).

1. Mécanismes de contrôle proactif

Les études ayant examiné les mécanismes de contrôle proactif dans le cadre du vieillissement normal mettent en évidence une moindre utilisation de ces mécanismes mais une plus grande sollicitation des mécanismes de contrôle réactif. En effet, dans des études d'imagerie fonctionnelle utilisant des tâches de détection, les seniors présentaient une activité diminuée des régions préfrontales pour les essais reposant sur l'activation des mécanismes de contrôle proactif, ceci étant associé à un taux d'erreurs plus important pour ces essais (Jimura & Braver, 2010 ; Paxton, Barch, Racine, & Braver, 2008 ; Velanova, Lustig, Jacoby, & Buckner, 2007). A l'inverse, ils présentaient une activation plus importante de ces mêmes régions pour les essais reposant sur l'activation des mécanismes de contrôle réactif, ceci étant cette fois associé à un faible taux d'erreurs. Ces résultats ont été interprétés comme le reflet d'une détérioration de la capacité des seniors à maintenir une stratégie de contrôle proactif, qui serait compensée par une utilisation plus importante des mécanismes de contrôle réactif (Paxton et al., 2008). Quelques études en potentiels évoqués ont également mis en évidence un fonctionnement diminué du contrôle proactif chez les seniors (Czernochowski et al., 2010 ; Kopp, Lange, Howe, & Wessel, 2014 ; West & Schwarb, 2006).

Une étude a par exemple montré que l'amplitude de la pre-stimulus slow wave était réduite chez les sujets âgés comparativement aux jeunes, et que l'amplitude de ce composant était corrélée à la vitesse de réponse chez les sujets jeunes mais pas chez les seniors. Pris ensemble, ces résultats suggèrent également une utilisation réduite des mécanismes de contrôle proactif chez les individus âgés (West & Schwarb, 2006).

2. Mécanismes de contrôle réactif consécutifs à un stimulus

2.1. Allocation attentionnelle

Les données disponibles concernant les effets du vieillissement normal sur les processus liés à l'allocation des ressources attentionnelles sont relativement hétérogènes. Concernant tout d'abord les études ayant examiné la P3, un indicateur de la quantité de ressources attentionnelles allouée au traitement des stimuli, une grande majorité d'entre elles montrent une réduction de l'amplitude de ce composant au cours du vieillissement (Fabiani & Friedman, 1995 ; Falkenstein et al., 2002 ; Fjell & Walhovd, 2001 ; Iragui, Kutas, Mitchiner, & Hillyard, 1993 ; Kok, 2000 ; Picton, Stuss, Champagne, & Nelson, 1984 ; Vallesi, 2011). Cet effet, mis en évidence dans une grande variété de paradigmes, a été interprété comme le reflet d'une altération avec l'âge dans l'utilisation des processus permettant l'allocation des ressources attentionnelles (Fjell & Walhovd, 2001 ; Kramer & Strayer, 1988 ; Polich, 1996 ; Wickens et al., 1983). Ces résultats sont par ailleurs compatibles avec l'une des théories du vieillissement proposant qu'une réduction des ressources attentionnelles chez les individus âgés est à l'origine des déficits qu'ils présentent dans diverses fonctions cognitives (Craik & Byrd, 1982).

Une autre spécificité des âgés a été mise en évidence dans quelques études utilisant des tâches d'oddball (Daffner et al., 2005 ; Riis et al., 2008). Dans ces études, dans lesquelles trois catégories de stimuli sont présentées au sujet (stimuli cibles « oddball », stimuli non-cibles « standards » et stimuli nouveaux), la consigne étant de répondre aux stimuli cibles, la P3 était plus ample chez les seniors comparativement aux jeunes sur les stimuli non-cibles

(standards). Selon les auteurs, ces résultats suggèrent que l'allocation des ressources attentionnelles chez les sujets âgés n'est pas dépendante de la nature des stimuli (cible ou non-cible) mais reflète plutôt la façon dont ces individus appréhendent la tâche de manière générale (Riis et al., 2008).

Un résultat assez similaire a été obtenu sur le composant P2, un autre indicateur de la quantité de ressources allouées au traitement des stimuli. En effet, quelques études utilisant des tâches auditives ont montré une augmentation de l'amplitude de cette positivité chez les seniors, suggérant une augmentation de la quantité de ressources allouée au traitement des stimuli dès les toutes premières étapes (Amenedo & Diaz, 1998, 1999 ; Anderer, Semlitsch, & Saletu, 1996 ; Getzmann, Gajewski, & Falkenstein, 2013 ; Gmehlin, Kreisel, Bachmann, Weisbrod, & Thomas, 2011 ; Pfefferbaum, Ford, Roth, & Kopell, 1980). Une corrélation positive entre l'amplitude de la P2 et les mesures de performance existant chez les sujets âgés uniquement a également été mise en évidence, suggérant que cette allocation attentionnelle supplémentaire lors de l'évaluation des stimuli était associée à de meilleures performances dans ce groupe (Gajewski, Stoerig, & Falkenstein, 2008 ; Getzmann et al., 2013).

2.2. Traitement du conflit

Concernant les processus associés au traitement du conflit, les données de la littérature montrent globalement une détérioration de ces processus avec l'âge. En effet, dans les études électrophysiologiques utilisant des tâches d'inhibition (de type Go/No-Go), les seniors présentent typiquement une amplitude réduite et une latence augmentée de la N2 (détection du conflit) et de la P3 (résolution du conflit) sur les stimuli conflictuels (essais No-Go), suggérant une altération des processus de traitement du conflit chez les individus âgés (Bokura, Yamaguchi, Matsubara, & Kobayashi, 2002 ; Falkenstein et al., 2002 ; Jodo & Kayama, 1992 ; Kok, 1986 ; Lucci, Berchicci, Spinelli, Taddei, & Di Russo, 2013 ; Pfefferbaum & Ford, 1988 ; Picton et al., 1984 ; Tachibana, Aragane, & Sugita, 1996). Par ailleurs, dans la mesure où l'augmentation de la latence de ces deux composants peut être interprétée

comme un retard dans l'activation de ces processus chez les seniors, ces résultats sont compatibles avec la théorie du vieillissement selon laquelle les déficits cognitifs des individus âgés peuvent s'expliquer par un ralentissement général des processus de traitement de l'information (Salthouse, 1996). Cependant, quelques études récentes ont à l'inverse montré une augmentation de l'amplitude de la P3 sur les stimuli conflictuels chez les individus âgés comparativement aux jeunes (Vallesi, 2011 ; Vallesi, Stuss, McIntosh, & Picton 2009 ; Vallesi & Stuss, 2010). Dans l'une de ces études, l'amplitude de la P3 évoquée par les stimuli conflictuels était corrélée chez les seniors à l'amplitude du lateralized readiness potentiel, un composant ERP associé à la préparation motrice de la réponse (Vallesi & Stuss, 2010). Cette augmentation de l'amplitude de la P3 a donc été interprétée comme le besoin d'une mobilisation attentionnelle accrue pour stopper la réponse initiée.

Plusieurs études ont aussi montré que l'amplitude de la N2 sur les stimuli conflictuels était plus large chez les seniors comparativement aux jeunes dans les régions postérieures du scalp, et que la P3 évoquée par les stimuli conflictuels était plus ample chez les seniors dans les régions frontales (Fallgatter, Mueller, & Strik, 1999 ; Friedman, Kazmerski, & Fabiani, 2004 ; Lucci et al., 2013). Cette « postériorisation » de la N2 et cette « frontalisation » de la P3 suggèrent que chez les individus âgés comparativement aux jeunes, la détection et la résolution du conflit (inhibition de la réponse) reposent sur l'activation d'un nombre plus important de régions cérébrales. De la même façon, des études en imagerie fonctionnelle ont mis en évidence une suractivation des régions préfrontales chez des individus âgés réalisant une tâche d'inhibition, et ce indépendamment du niveau de complexité de la tâche (Berchicchi, Lucci, Pesce, Spinelli, & Di Russo, 2012 ; Nielson, Garavan, Langenecker, Stein, & Rao, 2001 ; Nielson et al., 2002). Par exemple, dans l'étude de Nielson et al. (2002), la bonne résolution du conflit (réussite de l'inhibition) était associée chez les seniors à des activations plus importantes au niveau préfrontal et pariétal (de façon bilatérale), et à une activité augmentée du cortex cingulaire antérieur et de l'aire motrice pré-supplémentaire. Au niveau comportemental, on observe des performances chez les sujets âgés comparables à celles des jeunes en termes de précision (i.e. erreurs d'inhibition sur les essais conflictuels), mais une rapidité réduite quant au traitement des essais non-conflictuels (Falkenstein et al., 2002 ; Fallgatter et al., 1999 ; Grandjean &

Collette, 2011 ; Stawarczyk, Grandjean, Salmon, & Collette, 2012 ; Vallesi et al., 2009 ; Vallesi, 2011). Pris ensemble, ces résultats sont compatibles avec la notion de compensation mise en avant dans certaines théories du vieillissement (Reuter-Lorenz & Cappell, 2008). En effet, la suractivation des régions frontales observée chez les seniors dans une grande variété de tâches cognitives est souvent associée à de meilleures performances (Davis, Dennis, Daselaar, Fleck, & Cabeza, 2008 ; Gutchess et al., 2005 ; Heuninckx, Wenderoth, & Swinnen, 2008). Ces résultats sont typiquement considérés comme paradoxaux, dans la mesure où l'atrophie corticale se produisant au cours du vieillissement touche de façon importante ces régions frontales (Raz, 2008), la détérioration de ces régions avec l'âge étant même parfois envisagée comme le facteur explicatif des déficits cognitifs des seniors (West, 1996).

3. Mécanismes de contrôle réactif consécutifs à une réponse

Enfin, la plupart des études ayant examiné l'effet de l'âge sur le monitoring de l'erreur rapportent une altération de ce processus chez les seniors, qui se traduit par une réduction de l'amplitude de l'ERN (Band & Kok, 2000 ; Endrass et al., 2012b ; Falkenstein et al., 2001 ; Hoffmann & Falkenstein, 2011 ; Mathewson et al. 2005 ; Nieuwenhuis et al. 2002 ; Schreiber, Pietschmann, Kathmann, & Endrass, 2011). Ce dysfonctionnement des processus de monitoring de l'erreur a été le plus souvent mis en lien avec l'altération au cours du vieillissement du système dopaminergique mésencéphalique, l'ERN étant fréquemment considérée comme un signal d'erreur généré par ce système (Holroyd & Coles, 2002 ; Nieuwenhuis et al., 2002). Certaines études ont cependant rapporté des amplitudes de l'ERN équivalentes entre jeunes et âgés (Eppinger, Kray, Mock, & Mecklinger, 2008 ; Pietschmann, Endrass, & Kathmann, 2011 ; Pietschmann, Simon, Endrass, & Kathmann, 2008). Ces résultats contradictoires peuvent être liés aux caractéristiques des tâches utilisées : tâches d'apprentissage *versus* tâches de conflit de réponse (Schreiber, Endrass, Weigand, & Kathmann, 2012). La consigne de rapidité donnée dans ces dernières aurait notamment pour conséquence d'accentuer l'effet négatif de l'âge sur l'amplitude de l'ERN (Endrass et al.,

2012b). Par ailleurs, les rares études qui se sont intéressées à la Pe ont rapporté une réduction de ce composant chez les individus âgés (Band & Kok, 2000 ; Mathewson et al., 2005), qui serait également associée aux déficits de transmission dopaminergique.

S'agissant des processus de monitoring actifs suite à la réponse correcte, les données montrent plutôt une préservation de ces processus avec l'âge. En effet, quelques études ont montré que si les sujets âgés présentent typiquement une ERN réduite, ils présentent en revanche une CRN plus ample comparativement aux sujets jeunes (Eppinger et al., 2008 ; Pietschmann et al., 2008, 2011 ; Schreiber et al., 2011). Ces résultats ont été interprétés comme les indicateurs d'une stratégie plus contrôlée adoptée par les sujets âgés et visant à compenser la détérioration des processus de monitoring de l'erreur (Pietschmann et al., 2011 ; Schreiber et al., 2011). Cette stratégie plus contrôlée peut être mise en lien avec certains indicateurs comportementaux. Tout d'abord, la majorité des études mettent en évidence un ralentissement post-erreur qui est soit identique entre jeunes et âgés, soit plus important chez les seniors (Band & Kok, 2000 ; Gehring & Knight, 2000 ; Jackson & Balota, 2012 ; Nessler, Friedman, Johnson Jr, & Bersick, 2007 ; Nieuwenhuis et al., 2002 ; West & Moore, 2005). Ce ralentissement post-erreur étant typiquement interprété comme l'augmentation compensatoire du contrôle attentionnel suite à une erreur, ces résultats vont bien dans le sens d'un engagement plus important de ces mécanismes de contrôle chez les seniors. Par ailleurs, les temps de réponse plus lents des sujets âgés comparativement aux jeunes peuvent aussi être interprétés comme les indicateurs d'un recrutement accru des mécanismes de contrôle. En effet, ils reflètent typiquement l'adoption volontaire d'une stratégie de réponse prudente, dans laquelle la précision plutôt que la rapidité est privilégiée (Endrass et al., 2012b ; Falkenstein et al., 2001 ; Nieuwenhuis et al., 2002 ; Schreiber et al., 2011). La relation entre cette stratégie de réponse prudente, interprétée comme le reflet d'un contrôle compensatoire accru, et les déficits de monitoring de l'erreur, est renforcée par des résultats montrant que lorsque les sujets âgés sont obligés d'abandonner cette stratégie de réponse (i.e. ils ont pour consigne de répondre le plus vite possible), l'amplitude de l'ERN dans ce groupe est encore plus réduite (Endrass et al., 2012b).

Revue de la littérature

Staub, B., Daignon-Camus, N., Després, O., & Bonnefond, A. (2013). Sustained attention in the elderly: What do we know and what does it tell us about cognitive aging? *Ageing research reviews*, 12(2), 459–468.



Review

Sustained attention in the elderly: What do we know and what does it tell us about cognitive aging?

Bérengère Staub^{a,b,*}, Nadège Doignon-Camus^{a,b}, Olivier Després^a, Anne Bonnefond^{a,b}^a Laboratoire d'Imagerie et de Neurosciences Cognitives, UMR 7237, CNRS-UdS, 21 rue Becquerel, 67087 Strasbourg, France^b INSERM U1114, Centre Hospitalier Régional Universitaire de Strasbourg, Département de Psychiatrie, Hôpital Civil, 1, Place de l'Hôpital, 67091 Strasbourg, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 November 2012

Accepted 12 December 2012

Available online 20 December 2012

Keywords:

Vigilance decrement
Mindlessness
Attentional resources
Cognitive control
Inhibition
Monitoring

ABSTRACT

The ability to achieve and maintain the focus of cognitive activity on a given stimulation source or task, in other words to sustain attention or vigilance, is a fundamental component of human cognition. Given the omnipresent need for sustained attention in people's daily lives, a precise knowledge of the effects of normal aging on sustained attention is crucial. Findings in this topic are currently not consistent since they highlight either alteration or preservation or even the two, depending on the experimental approach used. Actually, the two existing approaches do not involve bottom-up and top-down processes at the same extent, which may in part account for this inconclusiveness. This review presents and attempts to explain these results by putting them into perspective with our current knowledge on cognitive aging and the two competing vigilance decrement theories, and discusses how they could inform us on our problems with sustaining attention over time.

© 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

One of the most influential theories of attention postulates the existence of three separate functions of attention associated with distinct anatomical networks: orienting, executive control, and alerting, the latter featuring both a phasic and a tonic aspect (Posner and Petersen, 1990). If the effects of aging on orienting, executive attention and phasic alerting have been the subject of many studies (Folk and Hoyer, 1992; Greenwood et al., 1993; Jennings et al., 2007; Kramer et al., 1994; Mahoney et al., 2010; Nebes and Brady, 1993; Zeef et al., 1996), this is not the case of the effects of aging on sustained attention, the tonic aspect of alerting, possibly because for a long time this concept overlapped with the concept of arousal (Oken et al., 2006). Indeed, research on sustained attention—then better known as “vigilance” – mainly studied the effects of sleep deprivation or sleep disorders on sustained attention ability (Akerstedt, 1988; Lim and Dinges, 2008; Roca et al., 2012; Wilkinson, 1965). As a result, data on normally awake subjects are scarce both in adolescent and adult populations, but even more in older adults.

Nevertheless, the ability to achieve and maintain the focus of cognitive activity on a given stimulation source or task, i.e. to sustain attention or vigilance, is a fundamental component of the cognitive capacities of humans, without which many other

perceptual and cognitive functions would be compromised (Parasuraman, 1998). Actually, given its importance for general cognitive functioning and by extension its critical role for goal-directed behavior (Sarter et al., 2001), sustained attention is itself sometimes considered as a core executive function (Rabbitt, 1997). Human neuropsychological and functional imaging studies have consistently shown the activation of fronto-parietal regions in subjects performing a sustained attention task: the anterior cingulate cortex, as well as dorsolateral prefrontal areas and parietal regions, located primarily but not exclusively in the right hemisphere, are prominently involved in the mediation of sustained attention (Cohen et al., 1992; Coull, 1998; Fink et al., 1997). Given the omnipresent need for sustained attention in people's daily lives (for hobbies and pursuits, but also for safety-critical aspects of daily life such as driving), a precise knowledge of the effects of normal aging on sustained attention is crucial. Unfortunately, findings in this topic are currently not consistent since they highlight either alteration or preservation or even the two, depending on what kind of experimental approach is used. It is worth noting that data on sustained attention in age-related dementia are not clear cut either, since it is still not clear whether this ability is affected at early or at advanced stages, or if it is affected at all (for reviews see Parasuraman and Haxby, 1993; Perry and Hodges, 1999; Berardi et al., 2005; Perry et al., 2000).

Before reviewing the literature on sustained attention ability in the elderly in detail and putting the studies into perspective with our knowledge on cognitive aging, we will start by precisely defining this ability and possible ways to study it, by presenting the two

* Corresponding author. Tel.: +33 3 88 10 67 66; fax: +33 3 88 10 62 45.

E-mail address: berengere.staub@etu.unistra.fr (B. Staub).

main theories to explain shortcomings in sustaining attention over time, and finally by describing the neuronal circuits that mediate sustained attention.

2. What is sustained attention? From measurement to functioning

2.1. Responding to infrequent targets versus inhibiting ongoing behavior

Two kinds of approaches have been used to investigate sustained attention in humans, each based on a particular method.

Among the first studies of sustained attention were those by Mackworth in the 1950s. To evaluate vigilance in British Air Force radar technicians in their military surveillance activity, Mackworth developed the clock test, a 2-h task during which the subject had to monitor the jumps of a clock hand and detect the rare and unpredictable times the hand made a double jump (Mackworth, 1948). This task was the starting point for the development of many vigilance tasks requiring the subject to monitor a continuous stream of stimuli for a prolonged period, and make an overt response on the rare occasions a target stimulus is presented. The alerting effect caused by the sudden appearance of a target stimulus and the associated response it elicits is assumed to reduce the demands on the endogenous sustained-attention system put on the individual performing this kind of task. These tasks have recently been referred to as “Traditionally Formatted Tasks” (TFTs) (Stevenson et al., 2011), and include for example the Continuous Performance Task (Rosvold et al., 1956) or the digit detection task developed by Nuechterlein et al. (1983). In this approach, sustained attention is precisely defined as a state of readiness to detect and respond to certain changes in the environment occurring at random time intervals over prolonged periods of time (Davies and Parasuraman, 1982; Mackworth, 1957; Parasuraman, 1986; Warm, 1984, 1993). Sustained attention ability is therefore evaluated by two indicators: overall vigilance, which refers to the general level of performance on the task (based on the measurement of classic parameters of the Signal Detection Theory: hit, correct rejection, omission and false alarm) and the vigilance decrement, which is typified by either a decrease in the number of correct detections over time or an increase in reaction time to signals over the watch keeping period. Most of the decrement typically appears within the first 15 min of watch (Teichner, 1974) but it can appear even more rapidly when task demand conditions are high (Helton and Russell, 2011; Nuechterlein et al., 1983; Rose et al., 2002; Temple et al., 2000).

More recently, probably because of the prevalence of automation in human-machine systems, interest in vigilance research has again increased and concomitantly, a new way to study it. Under the impulse of Robertson et al. (1997), the Sustained Attention to Response Task (SART) was developed. The SART is a Go/No-Go paradigm which consists in the random presentation of digits from 1 to 9, and requires the participant to respond to all the digits except for “3”. Contrary to a TFT, the SART requires the participant to respond overtly to non-signals and to withhold responding to signals. The Stop-Signal Task and the Error Awareness Task developed by Hester et al. (2005) are two additional paradigms that use this kind of response mode. In this approach, sustained attention is defined as the ability to inhibit a well-learned response on rare occasions. In this case, as opposed to what comes into play on a TFT, the need to inhibit a motor response in the context of an ongoing monotonous action strongly relies upon the endogenous sustained attention system. It is argued that the design of these tasks mimics real life situations in which an ongoing default behavior must be inhibited on the occurrence of rare unpredictable events and that this response format is more sensitive to failed sustained attention

than TFTs (Dockree et al., 2004, 2006; Robertson et al., 1997). In such paradigms, the main indicators of faulty sustained attention are short attention lapses, which behaviorally translate into failures to inhibit response on no-go trials – e.g. the digit “3” in the SART – and are thus more commonly referred to as action slips or errors of commission. In the SART, lapses occur very quickly, in less than 4 min of watch keeping. Consequently, the errors themselves, not the relative change in performance overtime, are interpreted as the indicator of failed sustained attention.

2.2. The resource theory versus the mindlessness theory

Two theories to explain shortcomings in sustaining attention over time are currently under debate in the literature: the resource depletion, mental fatigue or over-load theory and the mindlessness, boredom or under-load theory.

According to the resource theory of vigilance, the vigilance decrement is caused by a decline in available attentional resources with time on task. Cognitive resources available for information processing being limited (Davies and Parasuraman, 1982; Grier et al., 2003; Kahneman, 1973; Matthews, 2000; Warm et al., 2008), the continuous nature of the mental work during a sustained attention task would not allow for the replenishment of these resources, leading to a decline in performance efficiency (Helton and Warm, 2008; Helton and Russell, 2010; Hitchcock et al., 1999; Shaw et al., 2009). Studies demonstrating that sustained attention performance is impacted to a greater extent when the task demands high cognitive resources support this theory (Helton et al., 2004) as do those indicating that the vigilance decrement is accompanied by a parallel decline in cerebral blood flow velocity, a possible indicator of the supply of physiological resources (Hitchcock et al., 2003; Schnittger et al., 1997; Shaw et al., 2009, 2010).

The mindlessness theory, on the other hand, proposes that failures of sustained attention are caused by a lack of exogenously supported attention that is inherent to the repetitive, monotonous and non-arousing nature of the task and the concurrent decrease in endogenous attentional control as the task advances (Manly et al., 1999, 2004; O’Connell et al., 2008; Robertson et al., 1997). Consequently, awareness progressively disengages from the vigilance task, subjects become increasingly bored and more preoccupied with task unrelated thoughts (TUTs; Giambra, 1995; Smallwood et al., 2004), leading them to perform the task in a thoughtless and automatic manner. Robertson et al. (1997) support the general role of mindlessness in vigilance and claim that the SART response format should induce more mindlessness than TFTs. This theory is supported by results showing that absent minded individuals, defined by high scores on the cognitive failures questionnaire (CFQ; Broadbent et al., 1982) perform less well on sustained attention tasks than individuals with low scores on the CFQ (Robertson et al., 1997) and by results indicating an increase in self-reported day-dreaming over time on a SART, a marker of task disengagement (Giambra, 1989, 1995; Smallwood et al., 2004).

2.3. Top-down processes versus bottom-up processes

Collectively, and in a more structural and functional perspective, results of human and animal studies support a general model providing the basis for a reasonably precise description of the neuronal circuits that mediate sustained attention and describe sustained attention performance as relying on the convergence of bottom-up and top-down processes (Sarter et al., 2001) (see Fig. 1). Noradrenergic (Na) projections originating in the locus coeruleus (LC) and terminating in the thalamus (TH) and in the basal forebrain (BF) are one of the neuronal circuits that mediate sustained attention performance. This neuronal circuit is mainly driven by the ability of arousal inducing stimuli to trigger attentional processing by

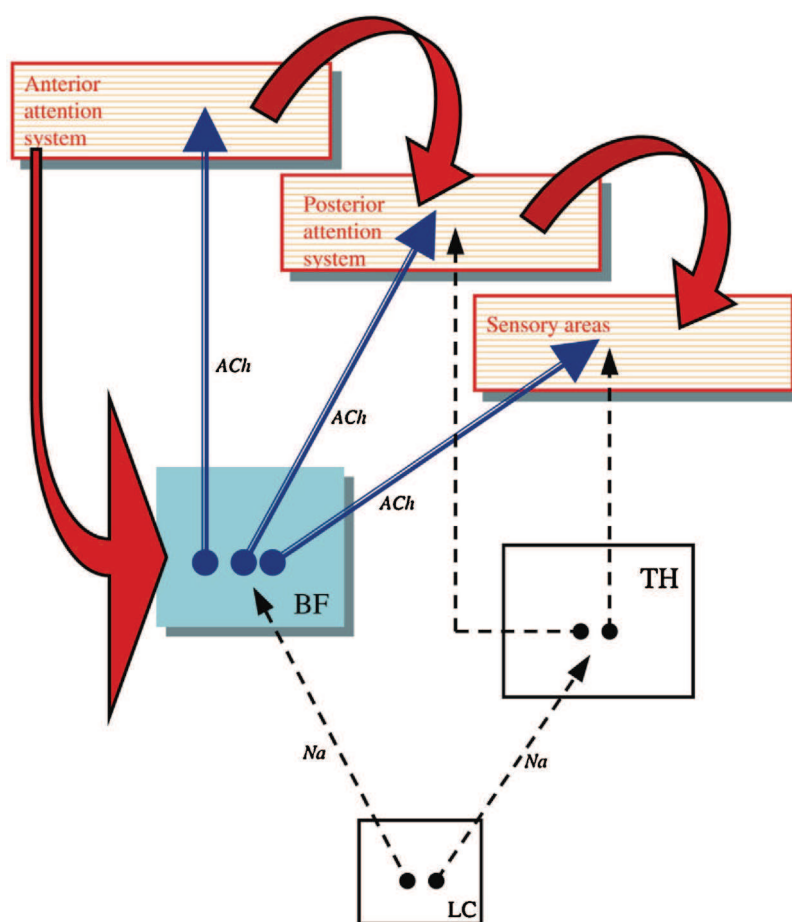


Fig. 1. Schematic representation of neuronal circuits mediating sustaining attention performance (Sarter et al., 2001).

recruiting higher cortical areas in a bottom-up manner. The basal forebrain corticopetal cholinergic projections (ACh) are the second crucial neuronal mechanism mediating sustained attention abilities. This mechanism has dual and interacting functions: (1) to contribute to the activation of the anterior attention system (lateral prefrontal cortex) and consequently to the activation of top-down processes (also referred to as executive control or cognitive control of attention) and (2) to enhance the processing of sensory inputs in primary and secondary sensory and sensory-associational regions (sensory areas) in a top-down manner.

Independently of the paradigm employed, it is in any case established that in order to successfully carry out a long repetitive task or to slow the decline in performance in the absence of exogenous alerting stimuli, cognitive control mechanisms (top-down mechanisms) have to be initiated endogenously to adjust and optimize the demand specific processing of information (Sarter and Paolone, 2011). More precisely, in a vigilance task, the cognitive control of attention specifically involves maintaining task goals and instructions “online”, monitoring performance and error, filtering distractors, and suppressing prepotent, and competitive responses, all related to activity in the anterior cingulate cortex (ACC) (Carter et al., 1998, 1999; Matsumoto and Tanaka, 2004; van Veen and Carter, 2006).

3. Sustained attention ability in elderly people

Results in the literature on sustained attention ability in the elderly reviewed in this section are presented according to the type of approach used, first TFTs, and second Go/No-Go tasks.

3.1. Responding to infrequent targets: alteration and/or preservation

The great majority of studies concerned with the effects of aging on sustained attention used TFTs in which vigilance decrement and overall vigilance are used as indicators to evaluate this ability in elderly people. Among the 23 studies inventoried, all of which were behavioral, half were conducted between 1962 and 1986, the other half between 1987 and 2005. Although in all the studies, subjects had to monitor a continuous stream of stimuli and to respond to infrequent targets, the tasks differed considerably in duration (from 150 s to 2 h), as well as in the type of stimuli presented (visual or auditory) and in their nature (sensory or cognitive) (see Table 1 for details). This heterogeneity makes it difficult to compare results and to draw clear conclusions and certainly partly explains discrepancies in the results obtained in the elderly.

3.1.1. Alteration

Almost half (11) of the 23 studies reviewed highlighted deficits in sustained attention among older versus younger adults, reflected by a greater vigilance decrement or by a lower overall vigilance. With time on task, compared to younger individuals, older adults exhibited a greater decrease in hit rate and a greater increase in false alarms (Deaton and Parasuraman, 1993) which may also come with an increase in response time (Thackray and Touchstone, 1981). For example, in the study by Thackray and Touchstone (1981) in which a real-life situation approach was used, subjects from three different age groups (18–29, 40–50, and 60–70) performed a 2-h simulated air traffic control task with alphanumeric symbols. Results showed that vigilance decrement was significantly related

Table 1
Summary of the main results of 27 studies examining the effect of aging on sustained attention FA = false alarms, O = old adults, Om = errors of omission, MA = middle-aged, RT = reaction time Y = young adults.

(A) Traditionally formatted tasks

Study	Task	Duration	Age range	Overall vigilance	Vigilance decrement
Berardi et al. (2001)	Detection of digit 0 among digits 1–9 (6 levels of stimulus quality)	8.1 min for each level of degradation	Y=20–39 (<i>n</i> =21) MA=40–59 (<i>n</i> =21) O=60–73 (<i>n</i> =20)	Hit: O=Y FA: O=Y RT: O=Y	Yes O=Y
Bunce and Sisa (2002)	Detection of digit 0 among digits 1–9 (1 level of stimulus quality)	9 min	Y=16–35 (<i>n</i> =26) O=45–65 (<i>n</i> =26)	Hit: O=Y FA: O=Y RT: O=Y	Yes O=Y
Bunce (2001)	Detection of digit 0 among digits 1 to 9 (3 levels of stimulus quality)	10 min for each condition	Y=21–30 (<i>n</i> =24) O=61–83 (<i>n</i> =24)	RT: O>Y	Yes O>Y
Davies and Griev (1963)	Auditory vigilance task (detection of 3 consecutive odd digits)	75 min	Y=17–29 (<i>n</i> =15) O=41–58 (<i>n</i> =15)	Hit: O=Y FA: O=Y	No
Davies and Davies (1975, experiment 2)	X-Continuous Performance Task	20 min	Y=18–31 (<i>n</i> =40) O=65–72 (<i>n</i> =40)	Hits: O<Y	–
Deaton and Parasuraman (1993)	Digit discrimination task (2 versions: sensory and cognitive)	32.4 min	Y=18–29 (<i>n</i> =20) MA=40–55 (<i>n</i> =20) O=65–85 (<i>n</i> =20)	Hit: O<Y FA: O>Y	Yes O>Y (in the sensory version only)
Filley and Cullum (1994, study 2)	Numerical attention test (digit cancellation task)	–	Y=50–69 (<i>n</i> =20) O=70–79 (<i>n</i> =18)	FA: O=Y RT: O>Y (i.e. time to complete the task)	–
Giambra and Quilter (1988)	Mackworth's clock test	60 min	18–91 (3 cross-sectional samples for a total of <i>n</i> =478, longitudinal sample of <i>n</i> =53)	Hits: O=Y RT: O>Y	Yes O=Y
Giambra (1997)	Detection of 17 mm × 17 mm squares among 20 mm × 20 mm neutral squares	30 min	Y=18–44 (<i>n</i> =146) MA=45–59 (<i>n</i> =143) O=60–85 (<i>n</i> =176)	Hit: O=Y FA: O>Y	Yes O=Y
Gridley et al. (1986)	Nonverbal auditory test (detection of a specific tone)	40 min	Y=19–34 (<i>n</i> =20) O=62–79 (<i>n</i> =20)	Hit: O=Y RT: O>Y	No
Griev and Davies (1962, experiment 3)	Auditory vigilance task (detection of 3 consecutive odd digits)	40 min	Y=18–31 (<i>n</i> =12) O=44–61 (<i>n</i> =12)	Hit: O=Y FA: O=Y	No
Harkins et al. (1974)	Odd-even numbers task (paced inspection task)	10.2 min	Y=18–25 (<i>n</i> =41) MA to O=46–72 (<i>n</i> =317)	Hits: O<Y FA: O>Y Om: O>Y	Yes O>Y (decrease in hit rate) O=Y (increase in RT)
Mani et al. (2005)	A-X-Continuous Performance Task	150 s	19–82 (<i>n</i> =32)	FA: O>Y Om: O>Y	–
Mouloua and Parasuraman (1995)	Letter detection task (high and low event rate; high, moderate and low level of spatial uncertainty)	30 min	Y=18–24 (<i>n</i> =36) O=60–74 (<i>n</i> =36)	Hit: O<Y	Yes O>Y
Neal and Pearson (1966)	2 auditory vigilance tasks: -detection of 3 consecutive odd digits -detection of a specific tone	64 min 60 min	Y=21–30 (<i>n</i> =16) O=39–62 (<i>n</i> =8)	Hit: O=Y FA: O=Y	No
Parasuraman and Giambra (1991)	Detection of 17 mm × 17 mm among 20 mm × 20 mm neutral squares (high and low event rate)	30 min	Y=19–27 (<i>n</i> =12) MA=40–55 (<i>n</i> =12) O=70–90 (<i>n</i> =12)	Hit: O<Y FA: O>Y	Yes O>Y
Parasuraman et al. (1989)	Detection of digit 0 among digits 1–9 (3 levels of stimulus quality)	8 min	Y=21–29 (<i>n</i> =20) O=65–75 (<i>n</i> =20)	Hit: O<Y FA: O>Y	Yes O>Y

Table 1 (Continued)

(A) Traditionally formatted tasks					
Study	Task	Duration	Age range	Overall vigilance	Vigilance decrement
Surwillo and Quilter (1964)	Mackworth's clock test	60 min	22–82 (mean Y = 43,7 (n = 53), mean O = 71 (n = 53))	Hit: O < Y RT: Y = O	Yes O > Y
Talland (1966)	Detection of a specific numeral (high, medium and low event rate)	3 experiments of 30, 36 and 48 min	20–69 (n = 40 in each of the 5 decades)	Hit: O < Y FA: O ≥ Y (at the fastest rate)	–
Thackray and Touchstone (1981)	Simulated air traffic control task with alphanumeric symbols	120 min	Y = 18–29 (n = 15) MA = 40–50 (n = 15) O = 60–70 (n = 15)	FA: O > Y Om: O > Y RT: O > Y	Yes O > Y
Thompson et al. (1963)	Odd-even numbers task (inter-stimulus interval of 1, 2 or 4 s)	5 min	Y = 18–35 (n = 30) O = 60–75 (n = 25)	Hit: O < Y at the fastest speed	–
Tomprowski and Tinsley (1996, experiment 2)	Visual continuous digit-matching vigilance test	60 min	Y = 18–20 (n = 15) O = 61–79 (n = 15)	Hit: O > Y FA: O = Y	No
Tune (1966)	Detection of 3 consecutive odd digits (among series of 10 digits that are followed by 10 s silence)	40 min	mean Y = 36,8 (n = 20) mean O = 65,6 (n = 20)	Hit: O = Y FA: O > Y	–
(B) Go/No-Go tasks					
Study	Task	Duration	Age range	Overall vigilance	Vigilance decrement
Brache et al. (2010)	“Industrial inspection” task (press to “good” parts and inhibit response to “bad” parts)	50 min	Y = 18–33 (n = 18) O = 55–70 (n = 17)	FA: O < Y RT: O > Y	Y only
Carriere et al. (2010)	SART	22 min	14–77 (n = 638)	FA: O < Y Om: O < Y RT: O > Y	–
Jackson and Balota (2011, experiment 3)	SART	22 min	mean Y = 20,9 (n = 31) mean O = 76,3 (n = 49)	FA: O < Y RT: O > Y	–
McAvinue et al. (2012)	SART	5.4 min	Y = 20 s/30 s (n = 28) O = 60 s/70 s (n = 27)	FA: O > Y Om: O > Y RT: O > Y	–

Deterioration
Mixed
Preservation
Improvement

to age: performance declined earlier in the session in the oldest group than in the youngest, as evidenced by higher rates of omission and commission errors, as well as by increased response times. Lower overall vigilance in older subjects has also been observed in other studies. Using a Continuous Performance Test (X-CPT), Davies and Davies (1975) reported a lower detection rate in their senior group, and, with the same kind of test (A-X-CPT), Mani et al. (2005), reported a lower hit rate and more false alarms in their old than in their young group. Filley and Cullum (1994) reported that old participants (age range 70–79) needed more time to complete the task at hand than slightly younger subjects (age range 50–69). Several studies indicated that these deficits in sustained attention in elderly people are even more accentuated when specific task parameters, such as increasing event rate or decreasing stimulus discriminability (by increasing the spatial uncertainty of stimulus or decreasing stimulus quality), which are known to have a detrimental effect on sustained attention performance, are manipulated (Sarter et al., 2001). This greater negative impact on the vigilance performance

of the elderly has been measured with parameters of accuracy (hit rate, false alarms) and/or speed, overall or over time. Using a visual digit discrimination task (a version of the task developed by Nuechterlein et al., 1983) with three levels of stimulus degradation (low, moderate and high), Parasuraman et al. (1989), found that older adults exhibited a greater vigilance decrement (evidenced by hit rate and false alarms) and lower overall vigilance (lower hit rate) than young subjects, particularly when the digits were highly degraded. Similar results were obtained more recently by Bunce (2001) and Mouloua and Parasuraman (1995). The negative impact on vigilance performance in the elderly has also been evidenced by the manipulation of event rates (Mouloua and Parasuraman, 1995; Parasuraman and Giambra, 1991; Talland, 1966; Thompson et al., 1963). With a 30-min detection task in which the event rate was high (40 per minute) or low (15 per minute), Parasuraman and Giambra (1991) found that the age related difference in vigilance decrement (hit rate and false alarms) was more pronounced when the event rate was high than when it was low.

3.1.2. Preservation

On the other hand, six studies that also used TFTs, reported similar sustained attention performance (same vigilance decrement and/or overall vigilance) in older and younger adults. Using very similar auditory vigilance tasks, Davies and Griew (1963), Griew and Davies (1962, experiment 3) and Neal and Pearson (1966) failed to find any difference in hit rate and false alarms for the task between younger and older adults. The absence of age related effect on vigilance performance has also been evidenced in studies in which the specific task parameters cited above were manipulated. For example, Berardi et al. (2001) found the same vigilance decrement (evidenced by hit rate, false alarms and response times) in their three age groups (20–39, 40–59 and 60–73) on a task with six levels of digit degradation similar to the task used by Parasuraman et al. (1989). Comparable results were obtained by Bunce and Sisa (2002). Similarly, no specific degradation of sustained attention performance in the elderly was evidenced in the study carried out by Tomporowski and Tinsley (1996, experiment 2) in which the working memory demand of the 60-min visual digit-matching test was manipulated.

3.1.3. Alteration and preservation

Finally, the results reported in the six last studies inventoried were more contrasted, depending on the measure of performance used. Two of the studies reported that the vigilance performance of older adults differed from that of other age groups only in reaction time (Giambra and Quilter, 1988; Gridley et al., 1986). Using cross-sectional and longitudinal samples of subjects who performed a 60-min Mackworth clock test, Giambra and Quilter (1988), for example, showed that response times became slower from middle age to old age, but these authors failed to find age differences in vigilance decrement (as evidenced by hit rate). In contrast, two other studies reported that with time on task, older adults exhibited a greater decrease in hit rate but comparable reaction time (Surwillo and Quilter, 1964) and rate of false alarms (Harkins et al., 1974). Finally, using the Parasuraman and Giambra (1991) 30-min sensory vigilance task, with only one event rate (40 per minute), Giambra (1997) found no age difference in hit rate for the task, although they did evidence a higher number of false alarms with time on task in the older (age range 60–85) than in the younger (age range 18–40) group. In the same way, Tune (1966) administered a 40-min auditory task to younger (mean age 39) and older (mean age 61) adults and found the same pattern of results – overall comparable detection rates but more false alarms in the elderly.

3.2. Inhibiting ongoing behavior: alteration and improving

The second approach, a more recent one that, unlike TFTs, requires the participant to respond overtly to non-signals and to withhold responding to signals, has been the subject of far fewer studies. We inventoried only four studies using Go/No-Go tasks carried out between 2010 and 2011, among which two used the SART. In such paradigms, the ability of sustained attention in elderly people is deduced from commission errors with a time on task analysis or overall analysis.

Homogenous results were reported by three of the four studies and revealed that older adults are generally slower (increased overall reaction time) but more precise than young individuals (Brache et al., 2010; Carriere et al., 2010; Jackson and Balota, 2011): older adults exhibit a lower vigilance decrement (Brache et al., 2010; Carriere et al., 2010) or greater overall vigilance (Jackson and Balota, 2011). For example, in the study conducted by Brache et al. (2010) a group of younger (age range 18–33) and older (age range 55–70) adults performed a task presented as a simulation of industrial inspection. They viewed “good” and “bad” parts, consisting of three black circles on a white background, with the central circle being

either equidistant from the two other flankers (“good” part), or moved off-center (“bad” part). The participants had to respond to “good” parts, which were presented 95% of the time, and withhold their response to the infrequent “bad” parts. The task lasted 50 min but included short breaks every 10 min. Compared to the young group, older adults produced lower error rates (errors of commission), which also remained stable throughout the vigil, whereas increased error rates with time on task were observed in younger subjects. Similar results were obtained by Carriere et al. (2010) on a 22-min SART. By comparing the performance of subjects aged from 14 to 77 years, these authors showed that both errors and response speed decreased with age in a generally linear fashion. In one of four experiments they conducted (experiment 3), which notably included short versions of the SART, Jackson and Balota (2011) also observed that overall, older adults were more accurate than younger adults and, once again, had longer reaction times. However, the results of a recent study contradicted those results: using a lifespan approach, McAvinue et al. (2012) observed impaired sustained attention performance in older adults compared to younger ones on two versions (fixed and random) of a 5 min SART. More precisely, they found the same increased reaction times with age, but in contrast to the previous studies, they found higher overall rates of errors of omission and errors of commission in the older group.

4. How can these discrepancies be explained?

Even after an extensive review of studies examining the effects of normal aging on sustained attention, it is difficult to draw a general conclusion concerning sustained attention ability in elderly people. Results show either impaired ability, or preserved or even improved ability in comparison to young people. The apparent lack of consensus regarding the definition of sustained attention and the way to study it is probably the main explanatory factor for these discrepancies. Indeed, sustained attention performance relies on the convergence of bottom-up and top-down processes but responding to infrequent targets or inhibiting ongoing behavior does not involve these processes to the same extent, does not necessarily engage the same cognitive processes and, as a result, the effects of aging on this ability are not the same. On one hand, the traditional approach relies mainly on arousal and bottom-up processes: in TFTs, perceptive processes are essential to detect and respond successfully to rare target stimuli. On the other hand, the more recent approach relies mainly on top-down processes: in Go/No-Go tasks, cognitive control processes are essential to inhibit a well-learned response on rare occasions. On this basis, and in order to explain the results on sustained attention ability in the elderly reviewed above, we will try to put our actual knowledge of cognitive aging into perspective with the two main theories of the vigilance decrement currently under debate in the literature: the resource theory and the mindlessness theory.

4.1. Shortage of attentional resources as one cause of impaired vigilance performance in the elderly

The complete or partial impairment of sustained attention ability highlighted by the majority of TFT studies (evidenced by a greater vigilance decrement and/or a lower overall vigilance in terms of precision and/or speed) could first be related to perceptual- and sensory-processing difficulties inherent to advancing age (Baltes and Lindenberger, 1997; Schneider and Pichora-Fuller, 1999). Indeed, as the ability to detect targets and target-triggered attentional processing is linked to the sensory salience of the target stimuli (Sarter et al., 2001), the difficulties encountered by older adults may impair their capacity to trigger

attentional processing in a bottom-up manner, and may actually have an adverse effect on vigilance performance. In line with this interpretation, results of studies in which task parameters such as stimulus discriminability or event rate are manipulated can also be linked to the processing resource view of cognitive aging (Kail and Salthouse, 1994; Salthouse, 1991), which holds that advancing age may impose increasing limitations on processing capacity and hence reduce the system's ability to process information efficiently. In other words, if age differences exist with respect to vigilance, they may be underpinned by age-related variance in processing resources (Bunce and Sisa, 2002; Craik and Byrd, 1982). The detrimental effect of these task parameters, which are assumed to tax attentional resources to a higher extent than more "standard" conditions, is consequently greater and/or faster in the senior population, as observed in the studies reviewed above. Altogether, these specificities inherent to advancing age provide some strong arguments for the resource theory of vigilance, according to which a decline in available cognitive resources is the cause of deteriorating performance with time on task (Helton et al., 2004).

Nevertheless let us not forget the few studies, which, using the same approach, provided evidence for preservation of the ability to sustain attention in older adults. Even if, given our knowledge on cognitive aging, these results are a little surprising, part of the explanation could certainly be linked to task parameters or to the characteristics of the subjects tested. For example, preservation of vigilance performance in auditory tasks compared to visual ones can be explained by the presence of an additional difficulty only in the visual modality: visually detecting a signal that can appear anywhere on a display first involves the need to locate it, which can be accomplished with varying degrees of skill across individuals, and thus possibly contributes to a decline in performance, independently of the individual's vigilance level per se (Davies and Griew, 1963; Faulkner, 1962). This notion of a difference in difficulty between the two sensory types of detection is strengthened by Finomore et al.'s (2008) finding that the overall level of workload on the NASA-TLX was significantly greater in the context of visual than auditory signals on a vigilance task. The intact performance of older adults in TFT paradigms could also be explained by the possibility that older adults greatly rely on top-down attentional control in order to compensate for a decline in basic and sensory and perceptual functions, as suggested by Madden and colleagues (Madden, 2007; Madden et al., 2003, 2005). Also and quite importantly, it should be recalled that in some of these reports, the age range of "older" subjects is quite low and consequently may not be comparable with the results of participants aged 60 or over.

4.2. Better endogenous attentional control as a cause of improved vigilance performance in the elderly

Despite the fact that the second approach characterized by the use of Go/No-Go tasks has been used in far fewer studies, overall, the results of these studies point to an increased ability for sustained attention in the elderly (evidenced by a lower vigilance decrement or greater overall vigilance in terms of precision) associated with slowing down (increased overall reaction time). These results can first be linked to studies demonstrating the absence of an age-related impairment of inhibition processes affecting the Go/No-Go procedure (Grandjean and Collette, 2011; Rush et al., 2006) even with time on task (Falkenstein et al., 2002). The absence of deficits was mainly attributed to the fact that the Go/No-Go paradigms were relatively easy tasks that required few cognitive resources. Like in the SART, only one stimulus–response mapping was needed and there was no conflict between perceptual and motor processes. Moreover, as evidenced by their overall reaction time compared to young people, older adults may have adopted a more conservative strategy in performing these vigilance tasks,

perhaps in part to compensate for their difficulty in inhibiting responses (Harnishfeger, 1995; Harnishfeger and Bjorklund, 1993; Hasher and Zacks, 1988). Older adults typically exhibit normal or lower error rates but longer response times than younger individuals (Endrass et al., 2012; Hoffmann and Falkenstein, 2011; Falkenstein et al., 2001; Mathalon et al., 2003) suggesting clear age differences in speed accuracy trade-offs. However, these inhibitory processes, which allow suppression of a predominant but inappropriate response, are not the only processes involved in such a situation of sustained attention. To perform a sustained attention task, inhibition is also required to prevent irrelevant information from entering the consciousness (i.e. TUTs, also referred to as mind wandering). According to Friedman and Miyake (2004), these two inhibitory processes can be differentiated according to the external/internal nature of the stimulus to be suppressed. Studies on this topic revealed that older adults are more capable of inhibiting TUTs than younger adults (Giambra, 1989; Jackson and Balota, 2011; Smallwood et al., 2004). The greater motivation and interest they displayed, even in tasks particularly conducive of boredom (Thackray and Touchstone, 1981), may account for their relatively low levels of reported mind wandering (Jackson and Balota, 2011). These motivational and cognitive results are perfectly consistent with the mindlessness theory of vigilance, according to which detection failures in vigilance tasks are due to participants' mindlessness, as the subjects become increasingly bored: because seniors are more intrinsically motivated, they are less likely to let their minds wander than younger subjects and thereby less subject to momentary task disengagement (Manly et al., 1999, 2004; O'Connell et al., 2008; Robertson et al., 1997).

In the same way, the higher degree of intrinsic motivation of older individuals and the fact that individuals become more conscientious with age (Terracciano et al., 2005) may increase the capacity of seniors to trigger attentional processing in a top-down manner, and to present a higher level of attentional effort, and consequently have a positive effect on their vigilance performance. It has indeed been shown that older adults present a high inclination to take up challenges, which is a form of intrinsic motivation, and which positively affects cognitive performance (Forstmeier and Maercker, 2008; Hess et al., 2012; Ryan et al., 2005; Vallerand et al., 1995). Several types of indicators suggest that among cognitive control mechanisms, performance and error monitoring are more recruited in the elderly than in younger people, thus partially explaining the improved sustained attention performance of older people (Endrass et al., 2012; Hoffmann and Falkenstein, 2011). For example, several studies found post-error slowing (i.e. the slowing of reaction times in trials following an error) to be much greater in the elderly than in the young (Band and Kok, 2000; Jackson and Balota, 2011). This age-related difference in post-error slowing, in addition to being an adaptive adjustment of a response criterion to more conservative levels (reflecting a more controlled response strategy), is evidence for increased recruitment and implementation of additional top-down attentional control to improve performance (Gehring et al., 1993; Kerns et al., 2004). In line with these behavioral data, ERN (error-related negativity) amplitudes have often been reported to be lower in older than in younger adults (Band and Kok, 2000; Falkenstein et al., 2001; Mathalon et al., 2003; Mathewson et al., 2005; Nieuwenhuis et al., 2002; Themanson et al., 2006) but unchanged or higher for the CRN (correct response negativity) (Eppinger et al., 2008; Pietschmann et al., 2008, 2011; Schreiber et al., 2011). Although reduced ERN amplitudes suggest performance monitoring deficits (as supported by behavioral data), enhanced CRN amplitude might point to the need of the elderly to monitor responses more carefully (Endrass et al., 2012; Schreiber et al., 2011). Finally, the higher recruitment of monitoring processes in the elderly is also evidenced by neuroimaging, which identified increased ACC (anterior cingulate)

cortex) and pre-SMA (pre-supplementary motor area) activation in older adults (Hester et al., 2004; Nielson et al., 2002), suggesting that in order to perform at the same behavioral level as young individuals, older adults required greater activation of the cortical regions involved in cognitive control. This result may be closer to the phenomenon of compensatory brain pattern activation, supportive of cognition in this population (Park and Reuter-Lorenz, 2009). Actually, several imaging studies evidenced bilateral activation in older adults for tasks that only involve unilateral recruitment in younger subjects (Cabeza et al., 2002; Grady et al., 2002; Reuter-Lorenz et al., 2000; Rypma and D'Esposito, 2001), a difference that has been associated with higher performance in older adults.

5. Conclusion and future directions

Sustained attention is a fundamental cognitive ability that is essential for functioning in everyday life, notably in today's aging population. However, the study of sustained attention has been quite neglected, not only in comparison with the other attentional processes but also with the other functions of cognitive aging. Still, renewed interest in this topic has emerged in the last few years. Recent studies rely on a different approach to sustained attention (in terms of its definition and of ways to study it) from the more "traditional approach", and this dichotomy is probably the main explanation for the conflicting results obtained: i.e. results showing that sustained attention ability in the elderly is either impaired, preserved or improved in comparison to young people.

As revealed by the present review, current knowledge of the cognitive neuroscience of aging can explain the poorer or better performance of elderly adults in a situation of sustained attention. Constructs such as attentional resources, mindlessness, cognitive control or attentional effort have been put forward to try to explain them. However, few studies have assessed such cognitive constructs in healthy elderly people, separately and in combination, and in the framework of a sustained attention paradigm. Further research is needed, notably combining neurophysiological and behavioral measures. For instance, the use of event-related-potential paradigms to directly test such constructs would certainly advance our understanding of the cognitive and brain mechanisms behind the better or worse vigilance performance of older adults and also the understanding of our shortcomings in sustaining attention over time, a question still under debate in the literature.

References

- Akerstedt, T., 1988. Sleepiness as a consequence of shift work. *Sleep* 11, 17–34.
- Baltes, P.B., Lindenberger, U., 1997. Emergence of a powerful connection between sensory and cognitive functions across the adult life span: a new window to the study of cognitive aging? *Psychology and Aging* 12 (1), 12–21.
- Band, G.P., Kok, A., 2000. Age effects on response monitoring in a mental-rotation task. *Biological Psychology* 51 (2–3), 201–221.
- Berardi, A.M., Parasuraman, R., Haxby, J.V., 2001. Overall vigilance and sustained attention decrements in healthy aging. *Experimental Aging Research* 27 (1), 19–39.
- Berardi, A.M., Parasuraman, R., Haxby, J.V., 2005. Sustained attention in mild Alzheimer's disease. *Developmental Neuropsychology* 28 (1), 507–537.
- Brache, K., Scialfa, C., Hudson, C., 2010. Aging and vigilance: who has the inhibition deficit? *Experimental Aging Research* 36 (2), 140–152.
- Broadbent, D.E., Cooper, P., Fitzgerald, P., Parks, K., 1982. The cognitive failures questionnaire (CFQ) and its correlates. *British Journal of Clinical Psychology* 21, 1–16.
- Bunce, D., 2001. Age differences in vigilance as a function of health-related physical fitness and task demands. *Neuropsychologia* 39 (8), 787–797.
- Bunce, D., Sisa, L., 2002. Age differences in perceived workload across a short vigil. *Ergonomics* 45 (13), 949–960.
- Cabeza, R., Anderson, N.D., Locantore, J.K., McIntosh, A.R., 2002. Aging gracefully: compensatory brain activity in high-performing older adults. *Neuroimage* 17, 1394–1402.
- Carriere, J.S., Cheyne, J.A., Solman, G.J., Smilek, D., 2010. Age trends for failures of sustained attention. *Psychology and Aging* 25 (3), 569–574.
- Carter, C.S., Botvinick, M.M., Cohen, J.D., 1999. The contribution of the anterior cingulate cortex to executive processes in cognition. *Reviews in the Neurosciences* 10, 49–57.
- Carter, C.S., Braver, T.S., Barch, D.M., Botvinick, M.M., Noll, D., Cohen, J.D., 1998. Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science* 280, 747–749.
- Cohen, R.M., Semple, W.E., Gross, M., King, A.C., Nordahl, T.E., 1992. Metabolic brain pattern of sustained auditory discrimination. *Experimental Aging Research* 92, 165–172.
- Coull, J.T., 1998. Neural correlates of attention and arousal: insights from electrophysiology, functional neuroimaging and psychopharmacology. *Progress in Neurobiology* 55 (4), 343–361.
- Craik, F.I.M., Byrd, M., 1982. Aging and cognitive deficits: the role of attentional resources. In: Craik, F.I.M., Treuhub, S. (Eds.), *Aging and Cognitive Processes*. Plenum Press, New York.
- Davies, A.D.M., Davies, D.R., 1975. The effects of noise and time of day upon age differences in performance at two checking tasks. *Ergonomics* 18 (3), 321–336.
- Davies, D.R., Griew, S., 1963. A further note on the effect of aging on auditory vigilance performance: the effect of low signal frequency. *Journal of Gerontology* 18, 370–371.
- Davies, D.R., Parasuraman, R., 1982. *The Psychology of Vigilance*. Academic Press, London, New York.
- Deaton, J.E., Parasuraman, R., 1993. Sensory and cognitive vigilance: effects of age on performance and subjective workload. *Human Performance* 6, 71–97.
- Dockree, P.M., Bellgrove, M.A., O'Keefe, F.M., Moloney, P., Aimola, L., Carton, S., Robertson, I.H., 2006. Sustained attention in traumatic brain injury (TBI) and healthy controls: enhanced sensitivity with dual-task load. *Experimental Aging Research* 168 (1–2), 218–229.
- Dockree, P.M., Kelly, S.P., Roche, R.A., Hogan, M.J., Reilly, R.B., Robertson, I.H., 2004. Behavioural and physiological impairments of sustained attention after traumatic brain injury. *Cognitive Brain Research* 20, 403–414.
- Endrass, T., Schreiber, M., Kathmann, N., 2012. Speeding up older adults: age-effects on error processing in speed and accuracy conditions. *Biological Psychiatry* 89, 426–432.
- Eppinger, B., Kray, J., Mock, B., Mecklinger, A., 2008. Better or worse than expected? Aging, learning, and the ERN. *Neuropsychologia* 46 (2), 521–539.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., Hohnsbein, J., 2001. Changes of error-related ERPs with age. *Experimental Aging Research* 138 (2), 258–262.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., Hohnsbein, J., 2002. Inhibition-related ERP components: variation with modality, age, and time-on-task. *Journal of Psychophysiology* 16 (3), 167–175.
- Faulkner, T.W., 1962. Variability of performance in a vigilance task. *Journal of Applied Psychology* 46 (5), 325–328.
- Filley, C.M., Cullum, C.M., 1994. Attention and vigilance functions in normal aging. *Applied Neuropsychology* 1 (1–2), 29–32.
- Fink, G.R., Halligan, P.W., Marshall, J.C., Frith, C.D., Frackowiak, R.S., Dolan, R.J., 1997. Neural mechanisms involved in the processing of global and local aspects of hierarchically organized visual stimuli. *Brain* 120, 1779–1791.
- Finomore, V.S., Shaw, T.H., Warm, J.S., Matthews, G., Riley, M.A., Boles, D.B., Weldon, D., 2008. Measuring the workload of sustained attention: further evaluation of the multiple resources questionnaire. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 52(18), pp. 1209–1213.
- Folk, C.L., Hoyer, W.J., 1992. Aging and shifts of visual spatial attention. *Psychology and Aging* 7, 453–465.
- Forstmeier, S., Maercker, A., 2008. Motivational reserve: lifetime motivational abilities contribute to cognitive and emotional health in old age. *Psychology and Aging* 23 (4), 886–899.
- 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.
- Gehring, W.J., Goss, B., Coles, M.G., Meyer, D.E., 1993. A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science* 4, 385–390.
- Giambra, L.M., 1989. Task-unrelated-thought frequency as a function of age: a laboratory study. *Psychology and Aging* 4 (2), 136–143.
- Giambra, L.M., 1995. A laboratory method for investigating influences on switching attention to task-unrelated imagery and thought. *Consciousness and Cognition* 4, 1–21.
- Giambra, L.M., 1997. Sustained attention and aging: overcoming the decrement? *Experimental Aging Research* 23 (2), 145–161.
- Giambra, L.M., Quilter, R.E., 1988. Sustained attention in adulthood: a unique, large-sample, longitudinal and multicohort analysis using the Mackworth Clock-Test. *Psychology and Aging* 3 (1), 75–83.
- Grady, C.L., Bernstein, L.J., Beig, S., Siegenthaler, A.L., 2002. The effects of encoding strategy on age-related changes in the functional neuroanatomy of face memory. *Psychology and Aging* 17, 7–23.
- Grandjean, J., Collette, F., 2011. Influence of response prepotency strength, general working memory resources, and specific working memory load on the ability to inhibit predominant responses: a comparison of young and elderly participants. *Brain and Cognition* 77 (2), 237–247.
- Greenwood, P., Parasuraman, R., Haxby, J.V., 1993. Changes in visuospatial attention across the adult life span. *Neuropsychologia* 31, 471–485.
- Gridley, M.C., Mack, J.L., Gilmore, G.C., 1986. Age effects on a nonverbal auditory sustained attention task. *Perceptual and Motor Skills* 62 (3), 911–917.
- Griew, S., Davies, D.R., 1962. The effect of aging on auditory vigilance performance. *Journal of Gerontology* 17, 88–90.
- Grier, R.A., Warm, J.S., Dember, W.N., Matthews, G., Galinsky, T.L., Parasuraman, R., 2003. The vigilance decrement reflects limitations in effortful attention, not mindlessness. *Human Factors* 45 (3), 349–359.

- Harkins, S.W., Nowlin, J.B., Ramm, D., Schroeder, S., 1974. Effects of age, sex, and time-on-watch on a brief continuous performance task. In: Palmore, E.B. (Ed.), *Normal Aging II: Reports from the Duke Longitudinal Studies, 1970–1973*. Duke University Press, Durham, N.C.
- Harnishfeger, K.K., 1995. The development of cognitive inhibition: theories, definitions, and research evidence. In: Dempster, F.N., Brainerd, C.J. (Eds.), *Interference and Inhibition in Cognition*. Academic Press, San Diego.
- Harnishfeger, K.K., Bjorklund, D.F., 1993. The ontogeny of inhibition mechanisms: a renewed approach to cognitive development. In: Howe, M.L., Pasnak, R. (Eds.), *Emerging Themes in Cognitive Development*. Springer-Verlag, New York.
- Hasher, L., Zacks, R., 1988. Working memory, comprehension, and aging: a review and a new view. In: Bower, G.H. (Ed.), *The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory*, vol. 22. Academic Press, New York.
- Helton, W.S., Russell, P.N., 2011. Working memory load and the vigilance decrement. *Experimental Brain Research* 212 (3), 429–437.
- Helton, W.S., Russell, P.N., 2010. Feature absence-presence and two theories of lapses of sustained attention. *Psychological Research* 75 (5), 384–392.
- Helton, W.S., Shaw, T.H., Warm, J.S., Matthews, G., Dember, W.N., Hancock, P.A., 2004. Workload transitions: effects on vigilance performance, and stress. In: Vincenzi, D.A., Mouloua, M., Hancock, P.A. (Eds.), *Human Performance, Situation Awareness and Automation Current Research and Trends*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ.
- Helton, W.S., Warm, J.S., 2008. Signal salience and the mindlessness theory of vigilance. *Acta Psychologica* 129 (1), 18–25.
- Hess, T.M., Emery, L., Neupert, S.D., 2012. Longitudinal relationships between resources, motivation, and functioning. *Journals of Gerontology. Series B, Psychological Sciences and Social Sciences* 67 (3), 299–308.
- Hester, R., Fassbender, C., Garavan, H., 2004. Individual differences in error processing: a review and reanalysis of three event-related fMRI studies using the Go/No-Go task. *Cerebral Cortex* 14, 986–994.
- Hester, R., Foxe, J.J., Molholm, S., Shpaner, M., Garavan, H., 2005. Neural mechanisms involved in error processing: a comparison of errors made with and without awareness. *Neuroimage* 27 (3), 602–608.
- Hitchcock, E.M., Dember, W.N., Warm, J.S., Maroney, B.W., See, J., 1999. Effects of cueing and knowledge of results on workload and boredom in sustained attention. *Human Factors* 41, 365–372.
- Hitchcock, E.M., Warm, J.S., Matthews, G., Dember, W.N., Shear, P.K., Tripp, L.D., Mayleben, D.W., Parasuraman, R., 2003. Automation cueing modulates cerebral blood flow and vigilance in a simulated air traffic control task. *Theoretical Issues in Ergonomic Science* 4, 89–112.
- Hoffmann, S., Falkenstein, M., 2011. Aging and error processing: age related increase in the variability of the error-negativity is not accompanied by increase in response variability. *PLoS One* 6 (2), e17482.
- Jackson, J.D., Balota, D.A., 2011. Mind-wandering in younger and older adults: converging evidence from the sustained attention to response task and reading for comprehension. *Psychology and Aging* 27 (1), 106–119.
- Jennings, J.M., Dagenbach, D., Engle, C.M., Funke, L.J., 2007. Age-related changes and the attention network task: an examination of alerting, orienting, and executive function. *Aging, Neuropsychology, and Cognition* 14, 353–369.
- Kahneman, D., 1973. *Attention and Effort*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Kail, R., Salthouse, T.A., 1994. Processing speed as a mental capacity. *Acta Psychologica* 86 (2–3), 199–225.
- Kerns, J.G., Cohen, J.D., MacDonald 3rd, A.W., Cho, R.Y., Stenger, V.A., Carter, C.S., 2004. Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science* 303 (5660), 1023–1026.
- 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, 491–512.
- Lim, J., Dinges, D.F., 2008. Sleep deprivation and vigilant attention. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1129, 305–322.
- Mackworth, N.H., 1948. The breakdown of vigilance during prolonged visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 1, 6–21.
- Mackworth, N.H., 1957. Some factors affecting vigilance. *The Advancement of Science* 53, 389–393.
- Madden, D.J., 2007. Aging and visual attention. *Current Directions in Psychological Science* 16 (2), 70–74.
- Madden, D.J., Whiting, W.L., Huettel, S.A., 2005. Age-related changes in neural activity during visual perception and attention. In: Cabeza, R., Nyberg, L., Park, D.C. (Eds.), *Cognitive Neuroscience of Aging Linking Cognitive and Cerebral Aging*. Oxford University Press, Oxford, New York.
- Madden, D.J., Whiting, W.L., Paul, C., 2003. Age-related changes in visual attention. *Advances in Cell Aging and Gerontology* 15, 41–88.
- Mahoney, J.R., Verghese, J., Goldin, Y., Lipton, R., Holtzer, R., 2010. Alerting, orienting, and executive attention in older adults. *Journal of the International Neuropsychological Society* 16, 877–889.
- Mani, T.M., Bedwell, J.S., Miller, L.S., 2005. Age-related decrements in performance on a brief continuous performance test. *Archives of Clinical Neuropsychology* 20 (5), 575–586.
- Manly, T., Davidson, B., Gaynord, B., Greenfield, E., Heutnicki, J., Parr, A., 2004. An electronic knot in the handkerchief: 'Content free cueing' and the maintenance of attentive control. *Neuropsychological Rehabilitation* 14, 89–116.
- Manly, T., Robertson, I.H., Galloway, M., Hawkins, K., 1999. The absent mind: further investigations of sustained attention to response. *Neuropsychologia* 37, 661–670.
- Mathalon, D.H., Bennett, A., Askari, N., Gray, E.M., Rosenbloom, M.J., Ford, J.M., 2003. Response-monitoring dysfunction in aging and Alzheimer's disease: an event-related potential study. *Neurobiology of Aging* 24 (5), 675–685.
- Matsumoto, K., Tanaka, K., 2004. Conflict and cognitive control. *Science* 303 (5660), 969–970.
- Mathewson, K.J., Dywan, J., Segalowitz, S.J., 2005. Brain bases of error-related ERPs as influenced by age and task. *Biological Psychology* 70 (2), 88–104.
- Matthews, G., 2000. *Human Performance: Cognition, Stress and Individual Differences*. Psychology Press, Taylor & Francis Group, Hove, East Sussex, Philadelphia, PA.
- McAvinue, L.P., Habekost, T., Johnson, K.A., Kyllingsbaek, S., Vangkilde, S., Bundesen, C., Robertson, I.H., 2012. Sustained attention, attentional selectivity, and attentional capacity across the lifespan. *Attention, Perception, & Psychophysics* 74 (8), 1570–1582.
- Mouloua, M., Parasuraman, R., 1995. Aging and cognitive vigilance: effects of spatial uncertainty and event rate. *Experimental Aging Research* 21 (1), 17–32.
- Neal, G.L., Pearson, R.G., 1966. Comparative effects of age, sex, and drugs upon two tasks of auditory vigilance. *Perceptual and Motor Skills* 23, 967–974.
- Nebes, R.D., Brady, C.B., 1993. Phasic and tonic alertness in Alzheimer's disease. *Cortex* 29, 77–90.
- Nielson, K.A., Langenecker, S.A., Garavan, H., 2002. Differences in the functional neuroanatomy of inhibitory control across the adult life span. *Psychology and Aging* 17 (1), 56–71.
- Nieuwenhuis, S., Ridderinkhof, K.R., Talsma, D., Coles, M.G., Holroyd, C.B., Kok, A., van der Molen, M.W., 2002. A computational account of altered error processing in older age: dopamine and the error-related negativity. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience* 2 (1), 19–36.
- Nuechterlein, K.H., Parasuraman, R., Jiang, Q., 1983. Visual sustained attention: image degradation produces rapid sensitivity decrement over time. *Science* 220, 327–329.
- O'Connell, R.G., Bellgrove, M.A., Dockree, P., Lau, A., Fitzgerald, M., Robertson, I.H., 2008. Self-alert training: volitional modulation of autonomic arousal improves sustained attention. *Neuropsychologia* 46 (5), 1379–1390.
- Oken, B.S., Salinsky, M.C., Elsas, S.M., 2006. Vigilance, alertness, or sustained attention: physiological basis and measurement. *Clinical Neurophysiology* 117 (9), 1885–1901.
- Parasuraman, R., 1986. Vigilance, monitoring, and search. In: Boff, K.R., Kaufman, L., Thomas, J.P. (Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance, Cognitive Processes and Performance, II*. Wiley, New York.
- Parasuraman, R., 1998. *The Attentive Brain*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Parasuraman, R., Giambra, L., 1991. Skill development in vigilance: effects of event rate and age. *Psychology and Aging* 6 (2), 155–169.
- Parasuraman, R., Haxby, J.V., 1993. Attention and brain function in Alzheimer's disease: a review. *Neuropsychology* 7, 242–272.
- Parasuraman, R., Nestor, P., Greenwood, P., 1989. Sustained-attention capacity in young and older adults. *Psychology and Aging* 4 (3), 339–345.
- Park, D.C., Reuter-Lorenz, P., 2009. The adaptive brain: aging and neurocognitive scaffolding. *Annual Review of Psychology* 60, 173–196.
- Perry, R.J., Hodges, J.R., 1999. Attention and executive deficits in Alzheimer's disease: a critical review. *Brain* 122 (Pt 3), 383–404.
- Perry, R.J., Watson, P., Hodges, J.R., 2000. The nature and staging of attention dysfunction in early (minimal and mild) Alzheimer's disease: relationship to episodic and semantic memory impairment. *Neuropsychologia* 38 (3), 252–271.
- Pietschmann, M., Endrass, T., Kathmann, N., 2011. Age-related alterations in performance monitoring during and after learning. *Neurobiology of Aging* 32 (7), 1320–1330.
- Pietschmann, M., Simon, K., Endrass, T., Kathmann, N., 2008. Changes of performance monitoring with learning in older and younger adults. *Psychophysiology* 45 (4), 559–568.
- Posner, M.I., Petersen, S.E., 1990. The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience* 13, 25–42.
- Rabbitt, P., 1997. *Methodology of Frontal and Executive Function*. Psychology Press, Hove, East Sussex, U.K.
- Reuter-Lorenz, P.A., Jonides, J., Smith, E.S., Hartley, A., Miller, A., Marshuetz, C., Koeppe, R.A., 2000. Age differences in the frontal lateralization of verbal and spatial working memory revealed by PET. *Journal of Cognitive Neuroscience* 12, 174–187.
- Robertson, I.H., Manly, T., Andrade, J., Baddeley, B.T., Yiend, J., 1997. 'Oops!': performance correlates of everyday attentional failures in traumatic brain injured and normal subjects. *Neuropsychologia* 35 (6), 747–758.
- Roca, J., Fuentes, L.J., Marotta, A., López-Ramón, M.F., Castro, C., Lupiáñez, J., Martella, D., 2012. The effects of sleep deprivation on the attentional functions and vigilance. *Acta Psychologica* 140 (2), 164–176.
- Rose, C.L., Murphy, L.B., Byard, L., Nikzad, K., 2002. The role of the Big Five personality factors in vigilance performance and workload. *European Journal of Personality* 16 (3), 185–200.
- Rosvold, H.E., Mirsky, A.F., Sarason, I., Bransome Jr., E.D., Beck, L.H., 1956. A continuous performance test of brain damage. *Journal of Consulting Psychology* 20 (5), 343–350.
- Rush, B.K., Barch, D.M., Braver, T.S., 2006. Accounting for cognitive aging: context processing, inhibition or processing speed? *Aging, Neuropsychology and Cognition* 13 (3–4), 588–610.
- Ryan, R.M., La Guardia, J.C., Solky-Butzel, J., Chirkov, V., Kim, Y., 2005. On the interpersonal regulation of emotions: emotional reliance across gender, relationships, and cultures. *Personal Relationships* 12 (1), 145–163.

- Rypma, B., D'Esposito, M., 2001. Age-related changes in brain-behavior relationships: evidence from event-related functional MRI studies. *European Journal of Cognitive Psychology* 13, 235–256.
- Salthouse, T.A., 1991. *Theoretical Perspectives on Cognitive Aging*. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, N.J.
- Sarter, M., Givens, B., Bruno, J.P., 2001. The cognitive neuroscience of sustained attention: where top-down meets bottom-up. *Brain Research Reviews* 35 (2), 146–160.
- Sarter, M., Paolone, G., 2011. Deficits in attentional control: cholinergic mechanisms and circuitry-based treatment approaches. *Behavioral Neuroscience* 125 (6), 825–835.
- Schneider, B.A., Pichora-Fuller, M.K., 1999. Implications of perceptual deterioration for cognitive aging research. In: Craik, F.I.M., Salthouse, T.A. (Eds.), *The Handbook of Aging and Cognition*. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, N.J., Hove.
- Schnitger, C., Johannes, S., Arnava, A., Munte, T.F., 1997. Relation of cerebral blood flow velocity and level of vigilance in humans. *NeuroReport* 8, 1637–1639.
- Schreiber, M., Pietschmann, M., Kathmann, N., Endrass, T., 2011. ERP correlates of performance monitoring in elderly. *Brain and Cognition* 76 (1), 131–139.
- Shaw, T.H., Guagliardo, L., de Visser, E., Parasuraman, R., 2010. Using transcranial doppler sonography to measure cognitive load in a command and control task. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 54(3), pp. 249–253.
- Shaw, T.H., Warm, J.S., Finomore, V., Tripp, L., Matthews, G., Weiler, E., Parasuraman, R., 2009. Effects of sensory modality on cerebral blood flow velocity during vigilance. *Neuroscience Letters* 461, 207–211.
- Smallwood, J., Davies, J.B., Heim, D., Finnigan, F., Sudberry, M.V., O'Connor, R.C., Obonsawin, M., 2004. Subjective experience and the attentional lapse. *Task engagement and disengagement during sustained attention*. *Consciousness and Cognition* 4, 657–690.
- Stevenson, H., Russell, P.N., Helton, W.S., 2011. Search asymmetry, sustained attention, and response inhibition. *Brain and Cognition* 20, 1732–1737.
- Surwillo, W.W., Quilter, R.E., 1964. Vigilance, age, and response-time. *American Journal of Psychology* 77, 614–620.
- Talland, G.A., 1966. Visual signal detection, as a function of age, input rate, and signal frequency. *Journal of Psychology* 63 (1), 105–115.
- Teichner, W.H., 1974. The detection of a simple visual signal as a function of time on watch. *Human Factors* 16, 339–353.
- Temple, J.G., Warm, J.S., Dember, W.N., Jones, K.S., LaGrange, C.M., Matthews, G., 2000. The effects of signal salience and caffeine on performance, workload, and stress in an abbreviated vigilance task. *Human Factors* 42, 183–194.
- Terracciano, A., McCrae, R.R., Brant, L.J., Costa, P.T., 2005. Hierarchical linear modelling analyses of the NEO-PI-R scales in the Baltimore longitudinal study of aging. *Psychology and Aging* 20, 493–506.
- Thackray, R.I., Touchstone, R.M., 1981. *Age-Related Differences in Complex Monitoring Performance (FAA-AM-81-12)*. FAA Civil Aeromedical Institute, Oklahoma City.
- Themanson, J.R., Hillman, C.H., Curtin, J.J., 2006. Age and physical activity influences on action monitoring during task switching. *Neurobiology of Aging* 27 (9), 1335–1345.
- Thompson, L.W., Opton Jr., E., Cohen, L.D., 1963. Effects of age, presentation speed, and sensory modality on performance of a vigilance task. *The Journals of Gerontology* 18, 366–369.
- Tomprowski, P.D., Tinsley, V.F., 1996. Effects of memory demand and motivation on sustained attention in young and older adults. *American Journal of Psychology* 109 (2), 187–204.
- Tune, G.S., 1966. Errors of commission as a function of age and temperament in a type of vigilance task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 18 (4), 358–361.
- Vallerand, R.J., O'Connor, B.P., Hamel, M., 1995. Motivation in later life: theory and assessment. *The International Journal of Aging & Human Development* 41 (3), 221–238.
- van Veen, V., Carter, C.S., 2006. Conflict and cognitive control in the brain. *Current Directions in Psychological Science* 15 (5), 237–240.
- Warm, J.S., 1984. An introduction to vigilance. In: Warm, J.S. (Ed.), *Sustained Attention in Human Performance*. Wiley, Chichester [West Sussex], New York.
- Warm, J.S., 1993. Vigilance and target detection. In: Huey, B.M., Wickens, C.D. (Eds.), *Workload Transition Implications for Individual and Team Performance*. National Academy Press, Washington, DC.
- Warm, J.S., Parasuraman, R., Matthews, G., 2008. Vigilance requires hard mental work and is stressful. *Human Factors* 50, 433–441.
- Wilkinson, R., 1965. Sleep deprivation. In: Edholm, O.G., Bacharach, A.L. (Eds.), *The Physiology of Human Survival*. Academic Press, London, New York.
- Zeeb, E.J., Sonke, C.J., Kok, A., Buiten, M.M., Kenemans, J.L., 1996. Perceptual factors affecting age-related differences in focused attention: performance and psychophysiological analyses. *Psychophysiology* 33, 555–565.

Chapitre 3 : Objectifs

Dans le cadre de ce travail de thèse nous nous sommes intéressés aux effets du vieillissement normal sur le processus d'attention soutenue et aux mécanismes de contrôle attentionnel qui le sous-tendent. En effet, si de nombreux résultats de la littérature font état d'un effet délétère de l'âge sur un grand nombre de processus cognitifs, l'étude des effets du vieillissement sur l'attention soutenue a été quelque peu délaissée. Cette thèse avait donc pour objectif principal d'avancer dans la connaissance des effets du vieillissement normal sur les capacités d'attention soutenue, en étudiant notamment, grâce à une approche électrophysiologique, les mécanismes cognitifs et neuronaux de contrôle attentionnel dont le rôle apparaît comme tout à fait crucial pour mener à bien une tâche longue et répétitive.

Les données de la littérature concernant les effets de l'âge sur les capacités d'attention soutenue décrivent des résultats contradictoires (détérioration, préservation voire même amélioration de cette capacité avec l'âge) qui pourraient être liés à l'existence de deux approches différentes, tant du point de vue de la nature des tâches utilisées que des indicateurs mesurés (Staub et al., 2013). En effet, comme nous l'avons présenté en détails dans le chapitre 1 de ce document, dans le cadre de la première approche, l'attention soutenue renvoie précisément au maintien d'un état de préparation pour détecter et répondre au long cours à certains changements survenant de façon imprévisible dans l'environnement (Davies & Parasuraman, 1982 ; Mackworth, 1957). Elle est étudiée par le biais de tâches de détection, dans lesquelles le sujet doit répondre à l'apparition de stimuli cibles rares (tâches dites traditionnelles ou TFT) et la baisse de vigilance est l'indicateur principalement utilisé pour évaluer les capacités (ou incapacités) d'attention soutenue. Dans la seconde approche, développée plus récemment, l'attention soutenue est définie comme la capacité à inhiber une réponse bien apprise à de rares occasions (Robertson et al., 1997). Cette capacité est étudiée par le biais de tâches d'inhibition de type Go/No-Go, dans lesquelles le sujet doit répondre à l'apparition de stimuli non-cibles fréquents, et ne pas répondre à l'apparition de stimuli cibles rares. Ces disparités tant théoriques que méthodologiques sont vraisemblablement les facteurs d'explication principaux à l'absence de consensus quant aux effets du vieillissement normal sur les capacités d'attention

soutenue. En effet, selon le modèle de l'attention soutenue décrit par Sarter et al. (2001), les performances d'attention soutenue reposent sur la convergence de processus ascendants (bottom-up) et descendants (top-down) (Sarter et al., 2001). Ces processus ne sont pas sollicités de la même manière lorsqu'il s'agit de détecter des cibles rares ou d'inhiber un comportement en cours. La bonne réalisation des tâches de détection traditionnelles (TFT) va principalement reposer sur l'activation de processus bottom-up (la perception du stimulus cible suffisant à elle seule à déclencher de façon quasi automatique la réponse demandée au sujet) alors que celle des tâches d'inhibition (Go/No-Go) va nécessiter l'activation de processus plus top-down et notamment, à l'apparition du stimulus cible, des processus de contrôle cognitif permettant l'inhibition de la réponse bien apprise (Manly et al., 1999). Sur cette base et les quelques études mettant en évidence une tendance globale des sujets âgés à recourir à un mode de traitement plus contrôlé (Daffner et al., 2005 ; Riis et al., 2008), l'absence de consensus quant aux effets du vieillissement normal sur le processus d'attention soutenue pourrait, par conséquent, être liée à une utilisation différente au cours du vieillissement des processus automatiques et contrôlés.

Dans cette perspective, notre premier objectif de travail (**étude 1**) a d'abord été d'évaluer les effets du vieillissement normal sur les capacités d'attention soutenue en utilisant les deux approches existant dans la littérature. A cette fin, nous avons mené une expérimentation à mesures répétées (comparaison intra-sujets) auprès de 30 sujets jeunes et 30 sujets âgés. Deux tâches d'attention soutenue, une tâche de détection traditionnelle (TFT) et une tâche d'inhibition (Go/No-Go), ne différant que du point de vue du type de réponse demandée au sujet, ont été utilisées. Dans la TFT, les sujets devaient répondre à l'apparition des stimuli désignés comme cibles (stimuli rares), et ne pas répondre aux stimuli non-cibles ; dans la Go/No-Go, les sujets devaient répondre aux non-cibles (stimuli fréquents), et ne pas répondre à l'apparition des cibles. Par ailleurs, ces deux tâches étaient en tous points identiques et de durée assez longue (30 minutes) pour permettre l'évaluation des effets du vieillissement sur le décours temporel des performances d'attention soutenue (baisse de vigilance). A la lumière des données de la littérature, nous avons fait l'hypothèse d'une baisse de vigilance chez les deux groupes d'âge dans les deux tâches (augmentation du

nombre d'erreurs au fil du temps), qui serait plus marquée chez les sujets âgés dans la TFT, et plus marquée chez les sujets jeunes dans la Go/No-Go.

A l'issue de cette évaluation comportementale et dans la mesure où les résultats obtenus mettaient clairement en évidence des effets différenciés de l'âge sur les capacités d'attention soutenue selon l'approche utilisée, notre deuxième objectif (**étude 2**) était d'étudier le déroulement temporel des processus automatiques et contrôlés dans chacune des deux approches et pour chacun de nos groupes d'âge. A cette fin, nous nous sommes appuyés sur des mesures électrophysiologiques (potentiels évoqués ou ERP). Nous avons fait l'hypothèse d'un engagement accru des processus contrôlés chez les sujets âgés comparativement aux sujets jeunes dans les deux tâches, leur permettant de maintenir un niveau stable de performances dans la Go/No-Go, mais pas dans la TFT.

A la suite de ces études, et afin de mieux comprendre les bonnes performances d'attention soutenue des seniors mises en évidence dans le cadre de ces deux premières études, notre travail expérimental s'est recentré autour de l'étude des effets du vieillissement normal sur les mécanismes cognitifs et neuronaux de contrôle attentionnel sous-tendant les capacités d'attention soutenue. En situation d'attention soutenue, ces mécanismes de contrôle attentionnel vont notamment permettre le maintien en mémoire de travail des objectifs de la tâche, l'évaluation (monitoring) des performances ou encore l'inhibition des réponses dominantes (Sarter & Paolone, 2011). Ces mécanismes, activés de façon top-down ou bottom-up, se différencient sur la base de leur dynamique temporelle (activation soutenue pour le mode proactif, transitoire pour le mode réactif) ou en termes de mobilisation attentionnelle (Braver et al., 2007 ; Braver, 2012). Si de nombreuses études ont mis en évidence une altération de ces mécanismes dans le cadre du vieillissement normal, quasiment aucune ne s'est penchée sur leur étude en situation d'attention soutenue.

Dans cette perspective, un troisième objectif (**étude 3**) a d'abord été d'étudier spécifiquement deux mécanismes essentiels au bon maintien des performances en situation d'attention soutenue, à savoir ceux liés à l'inhibition de la réponse et ceux liés à l'allocation des ressources attentionnelles. A cette fin, nous avons mené une expérimentation auprès de

22 sujets jeunes et 25 sujets âgés. La tâche d'attention soutenue utilisée était une tâche d'inhibition de type Go/No-Go de 72 minutes. L'activité électroencéphalographique des sujets a également été enregistrée pendant toute la durée de la tâche. Nous avons fait l'hypothèse d'une meilleure efficacité globale et d'un meilleur maintien des processus d'inhibition et d'allocation attentionnelle au fil de la tâche chez les participants âgés, ainsi qu'une distribution plus frontale des régions sous-tendant ces processus.

Enfin, le quatrième et dernier objectif de ce travail a été d'examiner dans une dernière étude (**étude 4**) l'ensemble des mécanismes de contrôle cognitif nécessaires à la réalisation de cette tâche d'attention soutenue en les distinguant sur la base de leur dynamique temporelle (mode de contrôle proactif, mode de contrôle réactif basé sur le stimulus et mode de contrôle réactif basé sur la réponse). A cette fin, nous avons mené une expérimentation auprès de 15 sujets jeunes et 16 sujets âgés. La tâche d'attention soutenue utilisée était la même que celle employée dans l'étude 3. En nous appuyant sur les quelques données issues de la littérature, nous avons émis l'hypothèse d'un désengagement au fil de la tâche du contrôle proactif au profit d'un engagement du contrôle réactif chez les sujets âgés.

DEUXIEME PARTIE: METHODOLOGIE

		Nombre de sujets	Âge	Niveau d'études	Score PM-38	Score standard mémoire des chiffres
Etude 1	Jeunes	30	24,8 (3,7)	15,2 (2,4)	86,5 (10,5)	10 (1,9)
	Âgés	30	65,2 (4,4)	14,3 (2,4)	87,5 (11,7)	9,9 (2,4)
Etude 2	Jeunes	27	24,4 (2,6)	15,4 (2,4)	86,5 (10,7)	10,2 (1,9)
	Âgés	25	65,5 (3,1)	14,5 (2,3)	87,2 (12,3)	9,8 (2,6)
Etude 3	Jeunes	22	23,2 (2,2)	14,3 (1,7)	83,5 (12,1)	11 (1,8)
	Âgés	25	64,8 (2,1)	13,7 (2,2)	89,1 (5,8)	11,3 (2,1)
Etude 4	Jeunes	15	23,1 (2,9)	14 (1,6)	80 (12,7)	10,3 (1,3)
	Âgés	16	64,1 (1,5)	13,3 (1,9)	87 (6,9)	11,5 (1,4)

Tableau 3. Caractéristiques des sujets et scores aux tests (moyennes et écarts-types).

I. Caractéristiques des sujets

Les deux tâches utilisées dans le cadre des études 1 et 2 ont été réalisées par 30 sujets jeunes et 30 sujets âgés. Pour l'étude 1, l'analyse des résultats s'est faite à partir des données des 30 sujets jeunes (âge moyen = 24,8 ; écart-type = 3,7) et des 30 sujets âgés (âge moyen = 65,2 ; écart-type = 4,4). Pour l'étude 2, 3 sujets jeunes et 5 sujets âgés ont été exclus de l'analyse car les données issues de leurs enregistrements électroencéphalographiques (EEG) n'étaient pas exploitables (tracés EEG très artefactés). L'analyse des résultats s'est donc faite à partir des données de 27 sujets jeunes (âge moyen = 24,4 ; écart-type = 2,6) et 25 sujets âgés (âge moyen = 65,5 ; écart-type = 3,1).

La tâche utilisée dans l'étude 3 a été réalisée par 25 sujets jeunes et 25 sujets âgés. Trois sujets jeunes ont été exclus de l'analyse car ils n'avaient pas produit un nombre suffisant de bonnes inhibitions (par période) pour générer des tracés ERP fiables. L'analyse des résultats s'est donc faite à partir des données de 22 sujets jeunes (âge moyen = 23,2 ; écart-type = 2,2) et 25 sujets âgés (âge moyen = 64,8 ; écart-type = 2,1).

Enfin, la tâche utilisée dans l'étude 4 a été réalisée par 15 sujets jeunes (âge moyen = 23,1 ; écart-type = 2,9) et 16 sujets âgés (âge moyen = 64,1 ; écart-type = 1,5).

Les sujets ont déclaré qu'ils n'avaient aucune pathologie psychiatrique ou neurologique, ni traitement médical. Ils avaient une vision normale ou corrigée à la normale. Les sujets âgés et jeunes ne présentaient pas de différences en termes de niveau d'études. Le niveau d'intelligence non verbale a été déterminé à partir des matrices progressives de Raven (PM-38, Raven, Raven, & Court, 1998), réalisées dans des conditions de temps limitées (20 minutes). Les sujets ont également réalisé l'épreuve de mémoire des chiffres de l'Echelle d'Intelligence de Wechsler pour Adultes – 3^{ième} Edition (WAIS-III, Wechsler, 1997).

Les caractéristiques des sujets (âge et niveau d'étude), ainsi que les scores moyens de chaque groupe d'âge dans les deux tests réalisés (PM-38 et épreuve de mémoire des chiffres) sont présentés dans le tableau 3.

Tous les sujets ont donné leur consentement par écrit et ont été indemnisés pour leur participation. Les protocoles ont été approuvés par le Comité de Protection des Personnes Est II.

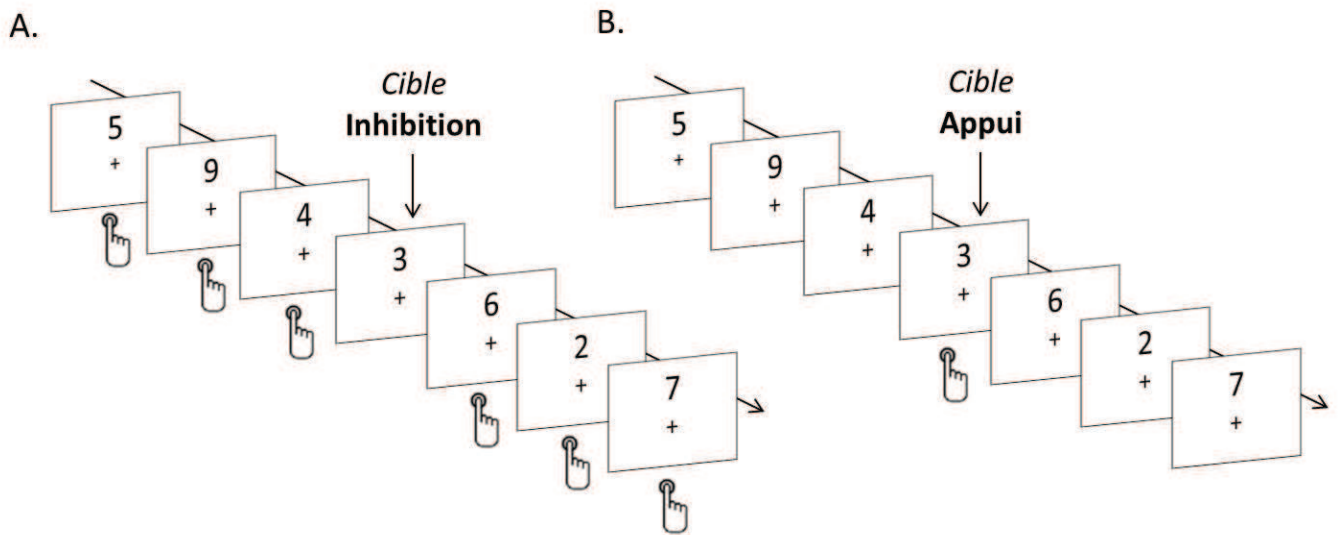


Figure 7.

A. Tâche d'inhibition: Sustained Attention to Response Task (Robertson et al., 1997).

B. Tâche de détection de format traditionnel.

Le temps de présentation du stimulus est de 150 msec. L'intervalle inter-stimuli est de durée variable: 1500, 1700, 1900, 2100, 2300 ou 2500 msec.

II. Paradigmes expérimentaux

1. Sustained Attention to Response Task (SART) et tâche de détection de format traditionnel

Dans les études 1 et 2, les participants ont réalisé deux tâches d'attention soutenue. La première tâche était la SART (Robertson et al., 1997). Il s'agit d'une tâche d'inhibition de type Go/No-Go dans laquelle les chiffres de 1 à 9 sont présentés sur un écran d'ordinateur de façon successive et aléatoire. La consigne donnée au sujet était d'appuyer le plus rapidement et le plus précisément possible sur un bouton réponse à l'apparition de chaque chiffre à l'exception du chiffre 3, pour lequel la réponse devait être inhibée. Tous les chiffres étaient présentés avec une probabilité égale (1/9), en police Arial (tailles : 100, 120, 140, 160 et 180). Ils étaient présentés sur un fond d'écran gris, et apparaissaient à une distance de 0.25° au-dessus d'une croix de fixation présente au centre de l'écran. Il était demandé au sujet de fixer le plus possible le centre de l'écran. Chaque chiffre était présenté pendant 150 msec, et suivi d'un intervalle inter-stimuli de durée variable (1500, 1700, 1900, 2100, 2300, ou 2500 msec). La tâche durait 30 minutes. Elle comprenait 90 blocs d'essais (chaque bloc étant constitué par la présentation aléatoire des 9 chiffres). La seconde tâche utilisée était une tâche de détection de format traditionnel (traditionally formatted tasks, TFT, Stevenson et al., 2011). Elle présentait exactement les mêmes caractéristiques que la SART, mais différait de la première tâche utilisée du point de vue de la consigne donnée au sujet : appuyer le plus rapidement et le plus précisément possible sur un bouton réponse à l'apparition du chiffre 3, et ne pas répondre à l'apparition des autres chiffres. La figure 7 représente schématiquement les caractéristiques de ces deux tâches que nous désignerons respectivement comme « SART Go/No-Go » et « SART TFT ». Avant chaque tâche, les sujets effectuaient une session d'entraînement de 2 minutes (6 blocs d'essais). Une pause de 10 minutes était accordée aux sujets entre les deux tâches. L'ordre de présentation des deux tâches était contrebalancé à l'intérieur de chaque groupe. La passation se déroulait dans une pièce obscure et insonorisée.

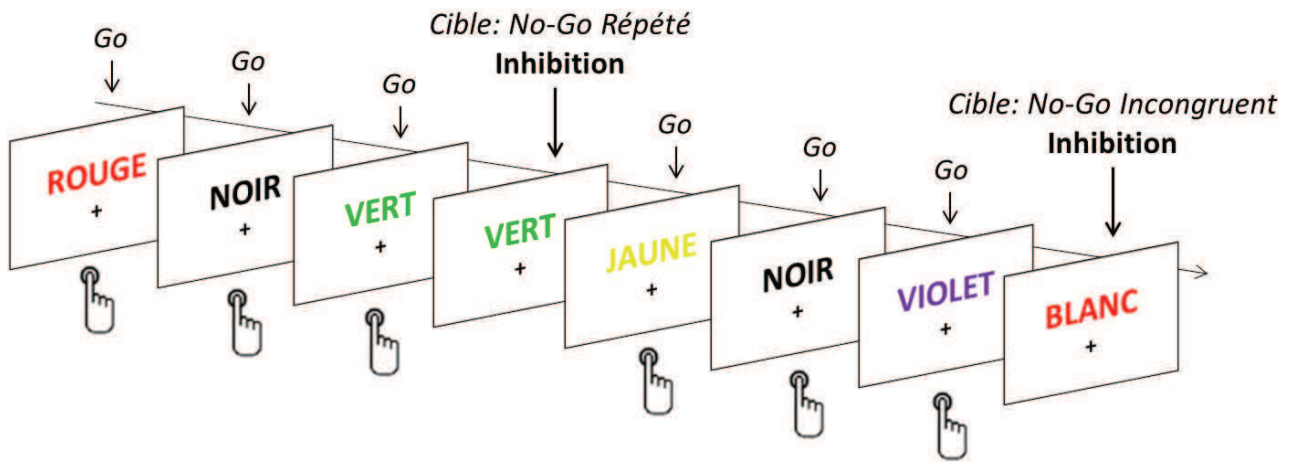


Figure 8. Error Awareness Task (Hester et al., 2005).

Le temps de présentation du stimulus est de 600 msec. L'intervalle inter-stimuli est de 1500 msec.

2. Error Awareness Task (EAT)

Dans les études 3 et 4, les participants ont réalisé l'Error Awareness Task (EAT ; Hester, Foxe, Molholm, Shpaner, & Garavan, 2005) (figure 8). Il s'agit d'une tâche d'inhibition de type Go/No-Go, qui consiste en la présentation successive de noms de couleurs (BLANC, JAUNE, NOIR, ROUGE, VERT, VIOLET) écrits dans différentes couleurs, de façon à manipuler la congruence entre le nom de couleur et la couleur du mot. Les stimuli étaient présentés sur un fond d'écran gris. Ils apparaissaient à une distance de 0.25° au-dessus d'une croix de fixation présente au centre de l'écran de façon continue. Il était demandé au sujet de fixer le plus possible cette croix centrale. Chaque stimulus était présenté pendant 600 msec, et suivi d'un intervalle inter-stimuli de 1500 msec. La consigne donnée au sujet était d'appuyer sur un bouton réponse pour les essais congruents (essais « Go »), c'est-à-dire les essais dans lesquels le nom de couleur correspondait à la couleur du mot, par exemple quand le mot « ROUGE » était écrit en rouge. Le sujet avait pour consigne de répondre après la disparition du mot, de façon à privilégier la précision plutôt que la rapidité. Il ne devait par contre pas appuyer sur le bouton réponse dans deux cas de figure :

- quand deux essais congruents identiques se succédaient : dans ce cas, le sujet ne devait pas appuyer sur le deuxième essai Go (essai « No-Go Répété »)
- quand l'essai était incongruent, c'est-à-dire que le nom de couleur ne correspondait pas à la couleur du mot (essai « No-Go Incongruent »)

La tâche durait 72 minutes. Elle comprenait 9 blocs, un bloc étant constitué de 222 essais : 198 essais Go et 24 essais No-Go (12 No-Go Répété et 12 No-Go Incongruent), correspondant à un ratio Go: No-Go de 10: 1. Tous les essais No-Go étaient suivis d'au moins 4 essais Go. La présentation des essais était aléatoire. Avant de commencer la tâche, les sujets effectuaient une session d'entraînement de deux minutes (60 essais). La passation se déroulait dans une pièce obscure et insonorisée.

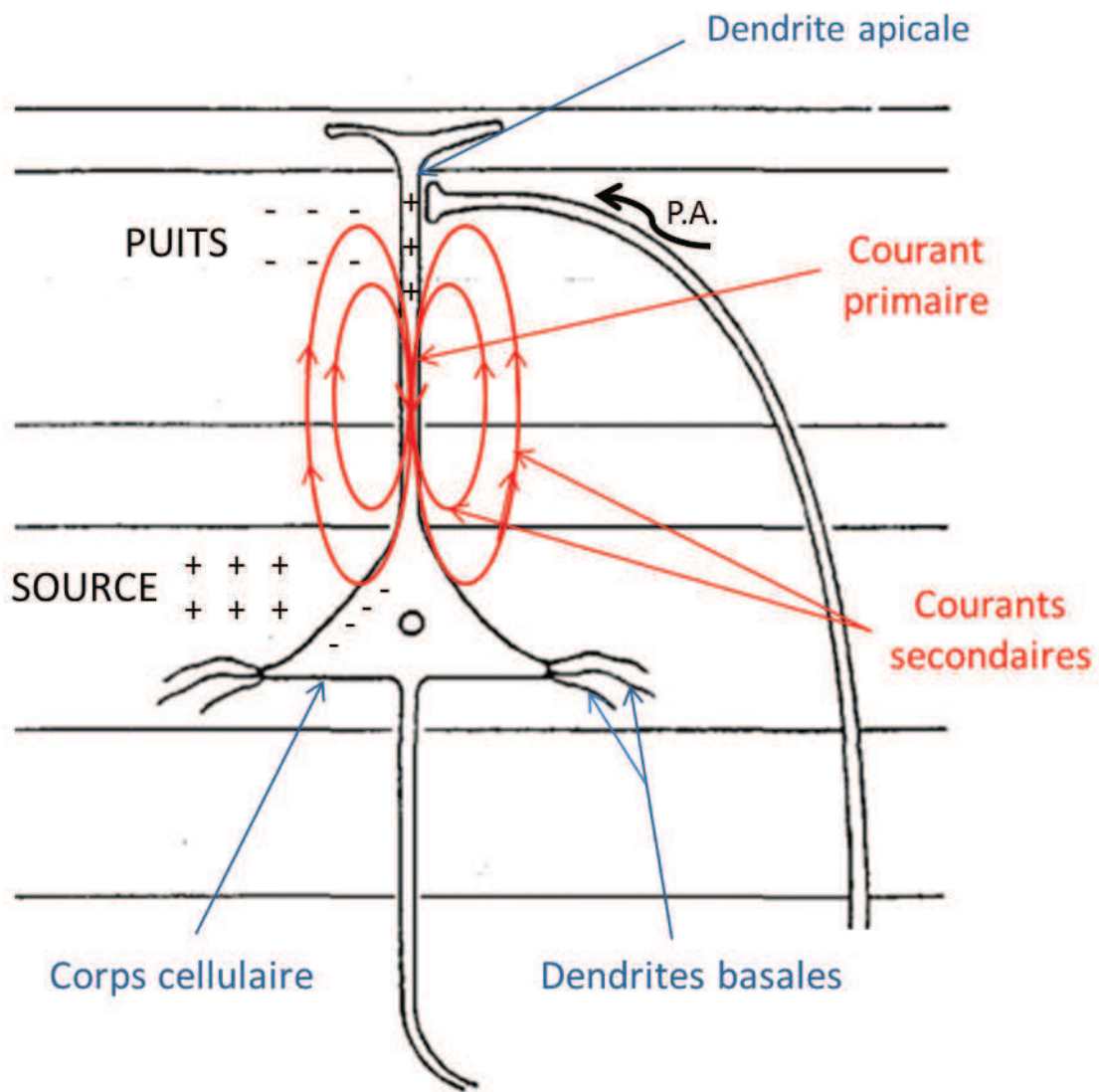


Figure 9. Représentation des courants électriques générés suite à l'arrivée d'un potentiel d'action (P.A.) au niveau d'une synapse excitatrice.

Des cations (principalement Na^+) vont pénétrer dans la cellule post-synaptique au niveau de la dendrite apicale, provoquant un courant entrant. Cette région, où le courant circulant dans le milieu extracellulaire *disparaît*, est un « puits » de courant. L'entrée de cations à l'intérieur du neurone rend l'espace extracellulaire plus négatif à cet endroit.

Suite à la propagation du potentiel post-synaptique le long de la dendrite, un courant sortant (sortie d'ions K^+ principalement) se forme au niveau du corps cellulaire du neurone. Cette région où un courant électrique *émerge* est appelée « source » de courant. Elle se caractérise par une positivité importante de l'espace extracellulaire.

L'inverse se produit dans le cas d'une synapse inhibitrice : une source de courant se forme au niveau de la zone post-synaptique et le reste de la membrane neuronale se comporte comme un puits.

III. Enregistrements électrophysiologiques et potentiels évoqués

1. Enregistrements électroencéphalographiques

1.1. Principes d'électrophysiologie

La technique d'électroencéphalographie (EEG) consiste à enregistrer de façon continue l'activité électrique cérébrale par le biais d'électrodes placées sur le scalp. Le tracé obtenu, l'électroencéphalogramme, représente l'évolution au fil du temps de la différence de potentiel entre une électrode définie comme référence, dans la mesure où elle a un potentiel électrique stable (oreille ou nez), et une électrode posée à la surface du scalp dont le potentiel électrique varie.

Cette activité électrique est générée par les potentiels post-synaptiques des neurones. Lorsqu'un potentiel d'action arrive au niveau d'une synapse, des neurotransmetteurs sont libérés, et leur fixation sur les récepteurs post-synaptiques entraîne une modification de l'état des canaux ioniques du neurone post-synaptique. Les échanges ioniques se produisant le long de la dendrite de la cellule post-synaptique entraînent la formation de courants électriques, à l'origine de l'activité enregistrable au niveau du scalp (figure 9). Lorsqu'un neurone est activé, deux types de courant sont générés : un courant intracellulaire dit « primaire », qui va engendrer des courants extracellulaires dit « secondaires », ceux-ci étant à l'origine de l'activité électrique enregistrée par les électrodes du scalp.

La résultante des courants générés au niveau de chaque synapse d'un neurone peut être représentée par un dipôle de courant. Selon ce modèle, le puits de courant correspond à la charge négative du dipôle, et la source de courant correspond à sa charge positive. Le neurone peut être représenté sous la forme d'un vecteur s'orientant du puits vers la source (figure 10). Conformément à cette définition, le neurone pyramidal peut être considéré comme un dipôle électrique, propriété qui lui est conférée par l'étendue et la position verticale de sa dendrite apicale, sur laquelle de nombreux contacts synaptiques vont générer

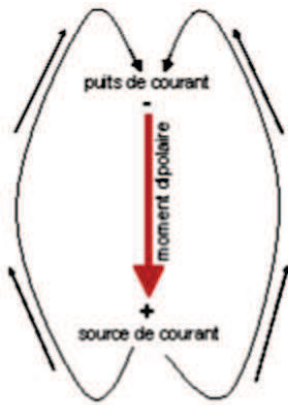


Figure 10. Modélisation en dipôle de courant d'un neurone pyramidal.

Un dipôle de courant est l'association sur une courte distance d'une source et d'un puits de courant, dans un milieu conducteur. Les courants générés au niveau d'un neurone pyramidal suite à la propagation d'un potentiel post-synaptique peuvent ainsi être représentés par un dipôle de courant.

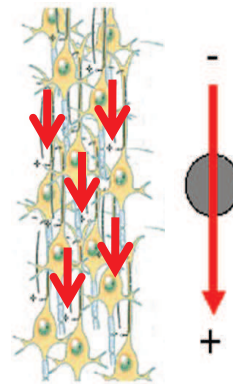


Figure 11. Dipôle de courant équivalent.

L'activité électrique d'un volume du cerveau où sont situés des neurones actifs, orientés de façon parallèle, peut être schématisée par un dipôle de courant équivalent. Il est la résultante de tous les dipôles décrits à l'échelle cellulaire.

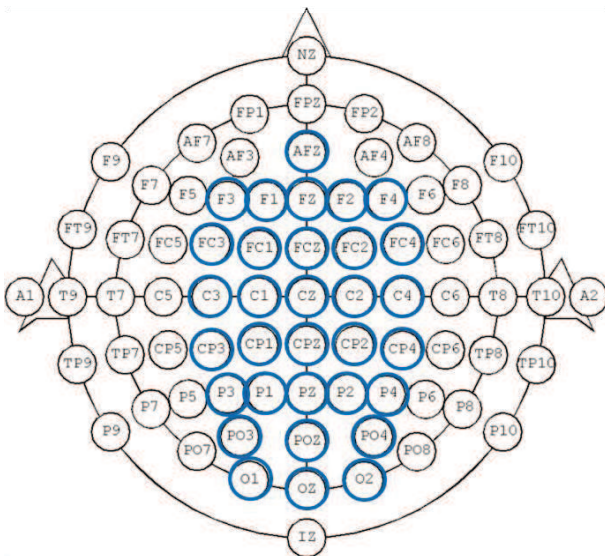


Figure 12. Représentation des 32 électrodes d'enregistrement (entourées en bleu).

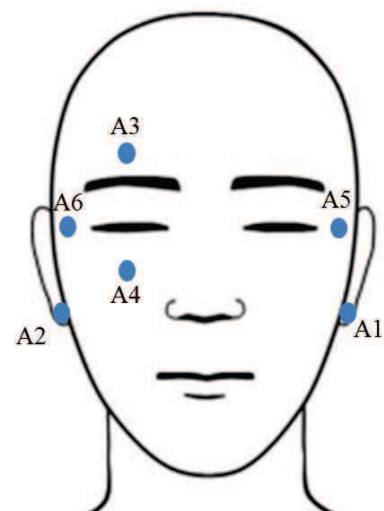


Figure 13. Représentation des 6 électrodes bipolaires.

Les mouvements oculaires verticaux ont été enregistrés à partir des électrodes A3 et A4, et les mouvements oculaires horizontaux à partir des électrodes A5 et A6.

Les électrodes A1 et A2 placées sur les lobes des oreilles ont servi de référence aux électrodes placées sur le scalp.

des courants électriques à travers la membrane neuronale et dans le tissu cérébral environnant.

L'activité d'un ensemble de neurones pyramidaux dans un volume du cortex peut être modélisée par un dipôle moyen, appelé « dipôle de courant équivalent ». Il correspond à la sommation des dipôles unitaires (figure 11). En effet, des courants électriques générés de façon synchrone par des neurones ayant une configuration parallèle et rapprochée vont s'additionner et former un champ électrique de plus grand périmètre. Ainsi, l'activité globale du cortex se résume à un nombre restreint de dipôles équivalents produisant des courants suffisamment importants pour être enregistrés par des électrodes posées sur le scalp. L'activité EEG résulte donc de la somme des courants synaptiques générés dans le milieu extracellulaire par un très grand nombre de neurones corticaux et correspondant à l'activité simultanée de plusieurs millions de synapses.

1.2. Paramètres d'enregistrement on-line

Dans les études 2, 3 et 4 où des mesures électroencéphalographiques ont été réalisées, l'EEG a été enregistré à partir de 32 électrodes mises en contact avec le scalp au moyen d'un bonnet et de gel conducteur. Les électrodes ont été placées selon le système 10-20, et de façon à recouvrir une large partie médiane du scalp (figure 12). Deux électrodes servant de référence ont été placées sur le lobe des oreilles. Quatre électrodes situées au niveau des yeux (électrodes bipolaires) ont par ailleurs permis d'obtenir un électro-oculogramme (EOG) (figure 13).

L'enregistrement du signal a été effectué avec un taux d'échantillonnage de 2048 Hz. Un filtre passe haut de 0.01 Hz et un filtre passe bas de 500 Hz ont été appliqués pendant l'enregistrement.

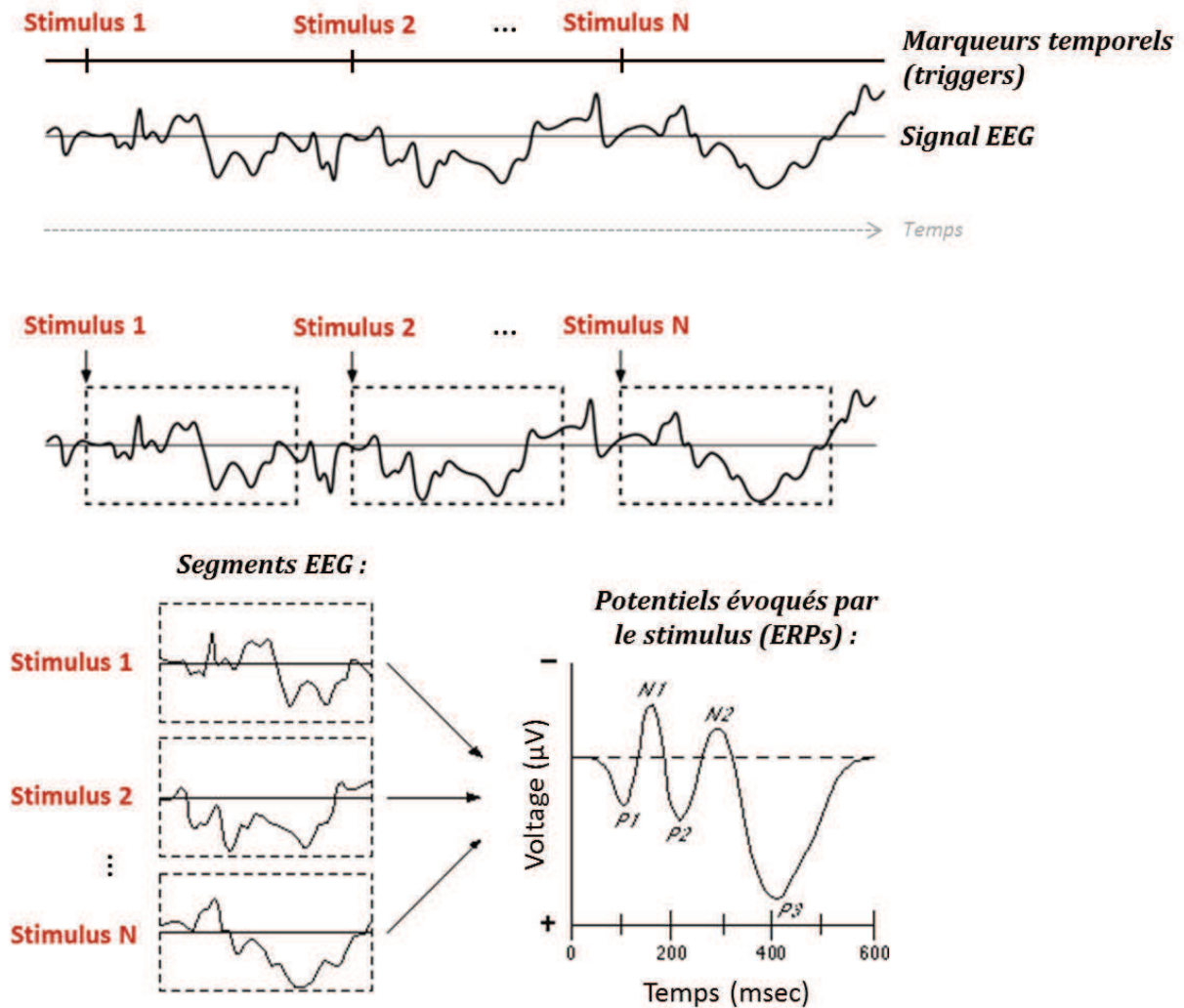


Figure 14. Technique du moyennage (Dawson, 1954).

Les variations de potentiels évoqués par l'évènement d'intérêt (e.g. un stimulus), repérables grâce aux marqueurs temporels (« triggers »), sont extraites du signal EEG global.

Les segments d'activité EEG ainsi obtenus sont ensuite moyennés : l'activité aléatoire va s'annuler, et l'activité liée à l'évènement va se manifester sous la forme de déflexions positives (P1, P2, P3...) et négatives (N1, N2...) nettement visualisables : les potentiels évoqués.

Chaque composant ERP est défini par sa polarité (**P**ositif ou **N**égatif) et son moment d'apparition après le stimulus.

2. Les potentiels évoqués

2.1. Principe

L'EEG fournit une mesure globale de l'activité cérébrale, ne permettant pas d'isoler des traitements cognitifs spécifiques. Pour visualiser la réponse du système nerveux à une stimulation particulière, la technique des potentiels évoqués est utilisée. Un potentiel évoqué cognitif reflète une modification transitoire de l'activité cérébrale consécutive à l'application d'un stimulus sensoriel. La variation de potentiel en réponse à un stimulus est très faible par rapport au reste du signal EEG. Pour extraire cette réponse de l'EEG global, la technique utilisée est celle du moyennage (Dawson, 1954) (figure 14). Les enregistrements EEG recueillis au cours d'une série d'essais sont moyennés après avoir été alignés par rapport à un événement externe tel que le début d'un stimulus ou d'une réponse. Cet alignement atténue les variations de l'activité électrique cérébrale qui est sans rapport avec l'évènement considéré. Au fur et à mesure du moyennage, cette activité EEG aléatoire va « s'annuler », alors que l'activité évoquée par l'évènement va s'additionner et ainsi être visualisable. Cette réponse évoquée, qui reflète l'activité nerveuse spécifiquement liée à un événement sensoriel, moteur ou cognitif, est appelée « potentiel lié à l'évènement » (« event-related potential », ERP). Les réponses évoquées constituées de déflexions positives et négatives, les composants ERP, correspondent aux différentes étapes de traitement de l'évènement. En effet, une particularité importante des réponses évoquées concerne la précision temporelle avec laquelle elles témoignent de l'activité nerveuse sous-jacente, dans la mesure où elles reflètent l'activation successive de systèmes neuraux distincts.

2.2. Etapes du traitement off-line

Pour visualiser les potentiels évoqués à partir des enregistrements EEG bruts de chaque sujet, plusieurs étapes d'analyse ont été réalisées :

- Décimation

Les enregistrements électroencéphalographiques ont été décimés (réduction par un facteur 4), le taux d'échantillonnage passant de 2048 Hz à 512 Hz.

- Re-référencage

Les enregistrements EEG ont été re-référencés au signal moyen des deux oreilles.

- Filtre

Les enregistrements EEG ont été filtrés grâce à un filtre passe-bas de 30 Hz (pente de 48 dB), permettant notamment d'atténuer les hautes fréquences liées à l'activité musculaire et au courant alternatif issu des installations électriques (50 Hz).

- Correction oculaire

Une correction des artefacts liés aux mouvements oculaires (clignements) a été appliquée (Gratton, Coles, & Donchin, 1983).

- Segmentation temporelle

Pour permettre l'analyse du déroulement temporel des indicateurs électrophysiologiques, l'électroencéphalogramme a été segmenté en trois périodes de temps de durée équivalente.

- Segmentation sur l'évènement

Une segmentation basée sur les événements a ensuite été réalisée (de façon identique dans chaque période). Les segments correspondent dans ce cas à des intervalles de temps entourant un événement (stimulus ou réponse), ce découpage étant réalisé pour chaque type d'évènement (e.g. stimulus Go, stimulus No-Go, réponse correcte, erreur). Cette segmentation se fait à partir de marqueurs temporels (triggers) qui marquent sur le tracé EEG les moments précis d'apparition de chaque événement (voir figure 14).

L'ensemble des segments correspondant à un même type d'évènement constitue alors un bloc.

- Réjection des artefacts

Dans chaque bloc, les segments contenant des artefacts (le plus souvent liés aux mouvements du sujet) ont été identifiés sur la base de critères d'amplitude et exclus du moyennage final. Ces critères étaient :

- la différence absolue de voltage entre deux échantillons voisins ne devait pas excéder 50 μV ;
- la différence entre l'amplitude maximale et l'amplitude minimale à l'intérieur d'un segment ne devait pas excéder 200 μV ;
- l'amplitude à l'intérieur d'un segment ne devait pas être supérieure à 100 μV ou inférieure à -100 μV ;
- la différence entre l'amplitude maximale et l'amplitude minimale au sein d'un intervalle de 100 msec ne devait pas être inférieure à 0,5 μV .

- Correction de la ligne de base (baseline)

Une correction de la ligne de base, calculée à partir de l'activité électrique moyenne précédant l'évènement, a été appliquée à tous les blocs.

- Moyennage par évènement

Les segments correspondant à un type d'évènement ont été moyennés à l'intérieur de chaque bloc, pour chaque individu.

- Grandes moyennes

La dernière étape a consisté à moyenner les tracés individuels (par groupe d'âge), permettant ainsi d'obtenir une « grande moyenne » pour chaque type d'évènement.

IV. Questionnaires subjectifs

Dans chacune de nos études, des questionnaires ont été présentés au sujet avant et/ou après la réalisation de la tâche. Ces questionnaires nous ont permis d'évaluer différentes dimensions subjectives telles que la motivation, le vagabondage d'esprit (pensées non liées à la tâche) ou la charge mentale. Les questionnaires sont présentés dans leur totalité en annexe.

1. Motivation

Dans nos 4 études, nous avons évalué la motivation des individus par le biais du volet « motivation » du Dundee Stress State Questionnaire (DSSQ, Matthews, Joyner, Gilliland, Campbell, Falconer, & Huggins, 1999). Les individus remplissaient ce questionnaire avant de commencer la tâche. Ce questionnaire contient 15 items, qui sont par exemple « j'ai envie de réussir la tâche » ou « je préférerais consacrer le temps passé sur la tâche à autre chose », auxquels le sujet doit répondre grâce à une échelle en 5 points allant de « pas du tout d'accord » (0) à « extrêmement d'accord » (4). Un score global par sujet a été calculé à partir de ces différents items.

2. Vagabondage d'esprit

Dans les études 1, 2 et 3, la fréquence des pensées non-liées à la tâche (vagabondage d'esprit) a été évaluée par le biais du volet « thinking content » du DSSQ (Matthews et al., 1999). Ce questionnaire était complété par les participants immédiatement après la fin de la tâche. Il contient 16 items qui sont par exemple « j'ai pensé à des membres de ma famille » ou encore « j'ai pensé à quelque chose qui s'est passé plus tôt dans la journée ». Les réponses sont données sur une échelle en 5 points allant de « jamais » (1) à « très souvent » (5). Un score global par sujet a été calculé à partir de ces différents items.

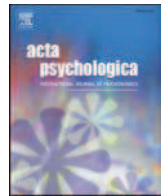
3. NASA-TLX

Dans les études 1 et 3, la charge mentale associée à la réalisation de la tâche a été évaluée avec la NASA-TLX (NASA-Task Load Index, Hart & Staveland, 1988). Ce questionnaire était complété par les participants immédiatement après la fin de la tâche, après le questionnaire de vagabondage. Il contient six échelles de mesures (exigence mentale, exigence physique, exigence temporelle, performance, effort, frustration), dont les valeurs allaient de 1 à 20. Un score par sujet a été calculé pour chaque échelle.

TROISIEME PARTIE: CONTRIBUTIONS EXPERIMENTALES

Etude 1

Staub, B., Daignon-Camus, N., Bacon, E., & Bonnefond, A. (2014). Investigating sustained attention ability in the elderly by using two different approaches: Inhibiting ongoing behavior versus responding on rare occasions. *Acta Psychologica, 146*, 51–57.



Investigating sustained attention ability in the elderly by using two different approaches: Inhibiting ongoing behavior versus responding on rare occasions



Bérengère Staub^{*}, Nadège Doignon-Camus, Elisabeth Bacon, Anne Bonnefond

INSERM U1114, Pôle de Psychiatrie-Hôpital Civil de Strasbourg, 1 place de l'Hôpital, 67091 Strasbourg Cedex, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 March 2013

Received in revised form 26 November 2013

Accepted 5 December 2013

Available online xxx

PsycINFO classification:

2340 Cognitive processes

2346 Attention

Keywords:

Vigilance decrement

Commission errors

Aging

SART

Mind wandering

Cognitive control

ABSTRACT

Previous studies on sustained attention ability in the elderly produced inconsistent results. The aim of this study was to evaluate sustained attention performance in younger and older individuals by using, in a within-subjects design, two versions of the same task (the sustained attention to response task, SART) in which only in the response mode differed: in a traditionally formatted task (TFT), subjects had to respond to rare targets, and in a Go/No-Go task they had to withhold response to rare targets. Results showed that in the TFT SART only the older group exhibited a vigilance decrement. On the contrary, only young individuals showed a vigilance decrement in the Go/No-Go SART. These results showed that older individuals, who also reported less mind wandering and a higher level of motivation, exhibited preserved sustained attention ability in the Go/No-Go SART, which could be explained by increased engagement of cognitive control mechanisms in this population. The discrepancy in performance depending on the approach used also underlines the need for further studies on the nature of attention failures and their underlying mechanisms.

© 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

A large body of literature shows that normal aging is accompanied by a variety of cognitive deficits, including deficits in verbal and visuospatial memory, episodic and working memory, executive functions, problem solving, and decision making (Craig & Salthouse, 2008; Glisky, 2007; Grady, 2008). Conversely, few data are available on sustained attention, and previous studies actually produced inconsistent results highlighting either a reduction in (McAvinue et al., 2012; Mouloua & Parasuraman, 1995; Parasuraman, Nestor, & Greenwood, 1989; Surwillo & Quilter, 1964), or preservation of (Berardi, Parasuraman, & Haxby, 2001; Neal & Pearson, 1966; Tomporowski & Tinsley, 1996), or even improvement in (Brache, Scialfa, & Hudson, 2010; Carriere, Cheyne, Solman, & Smilek, 2010) this ability with age (for a review, see Staub, Doignon-Camus, Després, & Bonnefond, 2012). Nevertheless the ability to achieve and maintain the focus of cognitive activity on a given stimulation source or task, i.e. to sustain attention or vigilance, is a fundamental cognitive process that influences many other aspects of cognition, and therefore plays a critical role in goal-directed behavior (Parasuraman, 1998; Sarter, Givens, & Bruno, 2001). So, given the omnipresent need for sustained attention in people's daily lives (for hobbies and other pursuits,

but also for safety-critical aspects of daily life such as driving), precise knowledge of the effects of normal aging on sustained attention is absolutely crucial.

A more detailed examination of the same literature revealed that two distinct approaches have been used to study sustained attention in the elderly. The majority of studies used the original approach developed by Mackworth (1948) in which participants must overtly respond to rare target signals and withhold responses to frequent non-signals. Tasks using this response format have been referred to as "Traditionally Formatted Tasks" (TFTs, Stevenson, Russell, & Helton, 2011). In this approach, sustained attention is precisely defined as a state of readiness to detect and respond to certain changes in the environment occurring at random time intervals over prolonged periods of time (Davies & Parasuraman, 1982; Mackworth, 1957; Parasuraman, 1986; Warm, 1984, 1993). Sustained attention ability is therefore evaluated by the vigilance decrement, typified by either a decrease in the number of correct detections (or an increase in false alarms/omissions) and/or an increase in reaction times to signals over the watch keeping period, and often associated with a change in the response criterion (β). Research on aging focused on sustained attention using TFTs has produced dissimilar results, but a large majority of authors reported more pronounced vigilance decrements in older adults than in younger subjects. With time on task, compared to younger individuals, older adults exhibited a greater decrease in hit rates and a greater increase in false alarms

^{*} Corresponding author. Tel.: +33 3 88 11 64 45; fax: +33 3 88 11 64 46.

E-mail address: berengere.staub@etu.unistra.fr (B. Staub).

(Deaton & Parasuraman, 1993) which may also be accompanied by an increase in response time (Thackray & Touchstone, 1981). Several studies indicated that these deficits in sustained attention in the elderly are even more accentuated when specific task parameters, such as increasing the event rate or decreasing stimulus discriminability (by increasing the spatial uncertainty of the stimulus or decreasing stimulus quality) are manipulated (Bunce, 2001; Mouloua & Parasuraman, 1995; Parasuraman & Giambra, 1991). These findings are in line with the processing resource view of cognitive aging (Craig & Byrd, 1982; Salthouse, 1991) and support the resource theory of the vigilance, according to which the vigilance decrement is caused by a decline in available cognitive resources with time on task (Helton et al., 2004). Other studies on this topic used tasks of a different nature, in which, contrary to a TFT, participants must overtly respond to frequent non-signals and withhold responses to rare target signals. In this approach, sustained attention is defined as the ability to inhibit a well-learned response on rare occasions. It is argued that the design of these tasks mimics real life situations in which an ongoing default behavior must be inhibited on the occurrence of rare unpredictable events and that this response format is more sensitive to failed sustained attention than TFTs (Dockree et al., 2006, 2004; Robertson, Manly, Andrade, Baddeley, & Yiend, 1997). The best-known task is the sustained attention to response task (SART), developed by Robertson and colleagues (Robertson et al., 1997). In such “Go/No-Go” paradigms, the errors themselves (referred to as action slips or errors of commission) are the indicators of sustained attention ability. Even though studies examining the effect of age on sustained attention using Go/No-Go tasks are less numerous than studies using TFTs, they mainly point to a better performance by older participants than by their younger counterparts. Older adults are generally slower (increased overall reaction time) but more precise than young individuals (Brache et al., 2010; Carriere et al., 2010; Jackson & Balota, 2012). For example, in the study conducted by Brache et al. (2010) in which a group of younger and older adults performed a task presented as a simulation of industrial inspection, older adults produced lower error rates (errors of commission) which also remained stable throughout the vigil, whereas increased error rates with time on task were observed in younger subjects. These findings are in line with those of studies showing that the elderly self-report less mind wandering and being less prone to boredom and to cognitive and action slips (Cheyne, Carriere, & Smilek, 2006; Giambra, 1989; Giambra, Camp, & Grodsky, 1992). Taken together, these results provide support for the mindlessness theory of vigilance, according to which sustained attention failures are related to the monotonous and non-arousing nature of the task, which leads subjects to become increasingly bored and more preoccupied with task unrelated thoughts, and to perform the task in a thoughtless and automatic manner (Manly, Robertson, Galloway, & Hawkins, 1999, Manly et al., 2004; O’Connell et al., 2008; Robertson et al., 1997).

So, given these contradictory results, what conclusions can be drawn regarding the sustained attention ability of older individuals? Is it another altered cognitive ability with aging or on the contrary a preserved one? To try to answer that question, we evaluated sustained attention performance in young and old individuals by using those two different approaches in a within-subjects design. To that end, it was imperative that the two tasks used only differed in their response mode (TFT versus Go/No-Go). We selected the SART for our study, and administered both a TFT version and a Go/No-Go version of this task to the participants. In addition, while Go/No-Go tasks used in previous studies were quite short compared to TFTs, we opted for a longer duration in order to examine how the rate of commission errors varied with time on task. In light of data reported in the literature, we hypothesized that subjects would exhibit a vigilance decrement characterized by an increase in errors over time in both tasks, but we expected the decrement to be more pronounced in older subjects than in younger subjects on the TFT SART, and more pronounced in younger subjects than in older subjects on the Go/No-Go SART.

2. Materials and methods

2.1. Subjects

Thirty younger (21 females; mean age: 24.8 years; range: 18–32) and 30 older adults (16 females; mean age: 65.2 years; range: 60–74) participated in this experiment. All subjects declared that they were free of neurological and psychiatric diseases and had normal or corrected-to-normal vision. All subjects gave their written informed consent, and the study protocol was approved by the local Ethics Committee. Each subject participated in one experimental session, which lasted approximately 90 min. Younger and older adults did not differ in their years of education (completed years of school and university education), $t(58) = 1.45$, $p = .15$ (younger adults: $M = 15.2$ years, $SD = 2.38$; older adults: $M = 14.3$ years, $SD = 2.44$). Scores on non-verbal intelligence as assessed by Raven’s progressive matrices (Raven, Raven, & Court, 1998) under time limited conditions (20 min) did not reveal any significant difference between the two groups, $t(58) = -.35$, $p = .73$ (younger adults: $M = 86.5$, $SD = 10.52$; older adults: $M = 87.5$, $SD = 11.65$).

2.2. Procedure and tasks

All participants completed two tasks (30 min each), with a 10-min break between the two, and a 2-minute practice period before each task. The order of presentation of the two tasks was counterbalanced within groups. One of the tasks was the sustained attention to response task (SART; Robertson et al., 1997), a Go/No-Go task in which digits ranging from “1” to “9” were presented in a random order. Subjects were instructed to respond as quickly and accurately as possible to the digits with a press on the control key of the keyboard upon presentation of each digit with the exception of the digit 3, which required response inhibition. Each digit was presented for 150 ms followed by an inter-stimulus interval (ISI) that varied randomly between 1500 and 2500 ms. All digits, including the 3, were presented with equal probability. Five randomly allocated digit sizes were presented to increase the demand for processing the numerical value and to minimize the possibility that subjects would set a search template for some perceptual feature of the target digit (“3”). Digit font sizes were 100, 120, 140, 160 and 180 in Arial font. The five allocated digit sizes subtended vertical angles of 1.39°, 1.66°, 1.92°, 2.18° and 2.45°, respectively, at a viewing distance of 70 cm. Digits were presented in black, 0.25° above a central yellow fixation cross on a gray background, on a standard 17 inch computer screen. The second task used only differed in the instructions given to the participant. Subjects were instructed to respond as quickly and accurately as possible only to the digit 3, and to withhold their response upon the presentation of the other digits. As typically in TFTs, the subject has to monitor a continuous stream of stimuli, and make an overt response on the rare occasions a target stimulus is presented. We thus use the term “TFT SART” when referring to the SART using this response mode, and the term “Go/No-Go SART” when referring to the regular SART. For each task, stimuli were presented in one block of 810 trials (90 of each of the nine digits) over a period of 30 min.

2.3. Subjective questionnaires

At different times during the experimental session, participants completed a series of questionnaires. Prior to starting the first task, participants completed the motivation component of the Dundee Stress State Questionnaire (DSSQ, Matthews et al., 1999), a 15-item questionnaire that assesses the participant’s motivation to perform the task at hand. Such items were, for example, “I expect the content of the task will be interesting” or “I am eager to do well”. Response scales ranged from “not at all” (0) to “extremely” (4). Participants were administered two further questionnaires after finishing each task. They first completed the thinking content component of the DSSQ, a 16-item questionnaire

assessing the frequency of task unrelated thoughts (TUT, Smallwood, Obonsawin, & Heim, 2003) that occurred during the previously completed task. Such items were, for example, “I thought about personal worries” or “I thought about something that happened earlier today”. Response scales ranged from “never” (1) to “very often” (5). Secondly, participants completed the NASA-Task Load Index (NASA-TLX, Hart & Staveland, 1988), which measures the perceived mental workload associated with the task by means of six rating scales (mental demand, physical demand, temporal demand, performance, effort, and frustration) ranging in value from 0 to 20.

2.4. Data analysis

For the analysis of performance data, the TFT SART and the Go/No-Go SART were divided into three 10-minute periods (270 trials each, 30 of each of the nine digits). Percentages of errors and mean reaction times served as performance measures: for the TFT SART, percentages of omission errors (i.e. failure to press on the target) and mean reaction times in target trials were taken into consideration; for the Go/No-Go SART, the percentage of commission errors (i.e. false presses on the target) and mean reaction times in non-target trials were taken into consideration. Performance data were subjected to analysis of variance (ANOVA), which included the between-subject factor Age (young/old) and the within-subject factors Task (TFT SART/Go/No-Go SART) and Period (p1/p2/p3). In order to examine post-error slowing in the Go/No-Go SART, mean reaction times on Go trials immediately following No-Go trials were subjected to an ANOVA that included the between-subject factor Age (young/old) and the within-subject factors Type of response on No-Go trials (correct withhold/commission error) and Period (p1/p2/p3).

For the analysis of subjective data, a *t*-test was performed on the results of the motivation component of the DSSQ. TUT and NASA-TLX results were each subjected to an ANOVA that included the between-subject factor Age (young/old) and the within-subject factor Task (TFT SART/Go/No-Go SART).

All statistical analyses were performed using Statistica software (StatSoft France, version 8.0).

3. Results

3.1. Performance data

Table 1 summarizes the results of the ANOVAs (main effects and interactions) performed on percentages of errors and mean reaction times.

The ANOVA performed on the percentage of errors revealed a significant main effect of task, $F(1,58) = 117.89$, $p < .001$, partial $\eta^2 = 0.67$: the percentage of errors was significantly greater in the Go/No-Go SART ($M = 27.94$, $SD = 4.21$) than in the TFT SART ($M = 1.54$, $SD = 0.71$). On the other hand, no main effect was found for age or period. In addition, a significant interaction between age, task and period was found,

Table 1
Results of the ANOVAs performed on percentages of errors and mean reaction times.

Effect	Degree of freedom	Percentage of errors			Reaction time		
		F	p	η^2_p	F	p	η^2_p
Age	1, 58	1.37	.25	0.02	0.17	.68	0.003
Task	1, 58	117.89	<.001	0.67	99.34	<.001	0.63
Age * Task	1, 58	3.12	.08	0.05	11.54	<.002	0.17
Period	2, 116	0.66	.51	0.01	14.9	<.001	0.20
Age * Period	2, 116	8.88	<.001	0.13	7.95	<.001	0.12
Task * Period	2, 116	2.17	.12	0.04	4.3	<.02	0.07
Age * Task * Period	2, 116	18.708	<.001	0.24	0.03	.97	<0.001

$F(2,116) = 18.71$, $p < .001$, partial $\eta^2 = 0.24$. In the TFT SART, omission errors increased significantly only in the older group between p1 and p2 ($p < .02$) and between p1 and p3 ($p < .001$); in the younger group, only a marginal increase was observed between p2 and p3 ($p < .07$). In the Go/No-Go SART, however, commission errors significantly increased in young subjects throughout the task (between p1 and p2, $p < .004$, and between p1 and p3, $p < .003$), whereas no such increase was observed in the older group, in which commission errors actually decreased between p1 and p2 ($p < .001$). Results obtained on the percentage of errors are illustrated in Fig. 1.

The ANOVA performed on mean reaction times revealed a significant main effect of task ($F(1,58) = 99.34$, $p < .001$, partial $\eta^2 = 0.63$): reaction times were significantly longer in the TFT SART than in the Go/No-Go SART. A significant main effect of period was also found ($F(2,116) = 14.9$, $p < .001$, partial $\eta^2 = 0.20$): reaction times increased between p1 and p2 ($p < .001$), and between p1 and p3 ($p < .001$). No main effect of age was found. The interaction between age, task and period was not significant ($p > 1$). However, planned comparisons indicated that in the TFT SART, reaction times increased between p1 and p2 ($p < .001$) and between p1 and p3 ($p < .001$) only in the older group, whereas no such increase was observed in the younger group. Similarly, on the Go/No-Go SART, reaction times increased between p1 and p2 ($p < .006$) and between p1 and p3 ($p < .002$) only in older participants. Results obtained on reaction times are illustrated in Fig. 2.

Regarding post-error slowing analyses in the Go/No-Go SART, the ANOVA performed on mean reaction times on Go trials following No-Go trials revealed a significant interaction between age and type of response on No-Go trials ($F(1,56) = 6.42$, $p < .02$, partial $\eta^2 = 0.10$): planned comparisons indicated that older adults had significantly longer reaction times after the commission of an error than after a correct withhold ($p < .001$), whereas no such difference was observed in young subjects ($p > 1$) (Fig. 3). Table 2 summarizes all the main effects and interactions obtained on this ANOVA.

3.2. Subjective data

3.2.1. Motivation component of the DSSQ

The *t*-test revealed a significant difference between the two groups ($t(58) = -4.05$, $p < .001$): older adults (score: $M = 2.69$, $SD = 0.35$) were more motivated than younger adults (score: $M = 2.28$, $SD = 0.43$).

3.2.2. Thinking component of the DSSQ

The ANOVA revealed a main effect of age ($F(1,58) = 9.17$, $p < .004$, partial $\eta^2 = 0.14$): younger adults ($M = 1.08$, $SD = 0.07$) reported

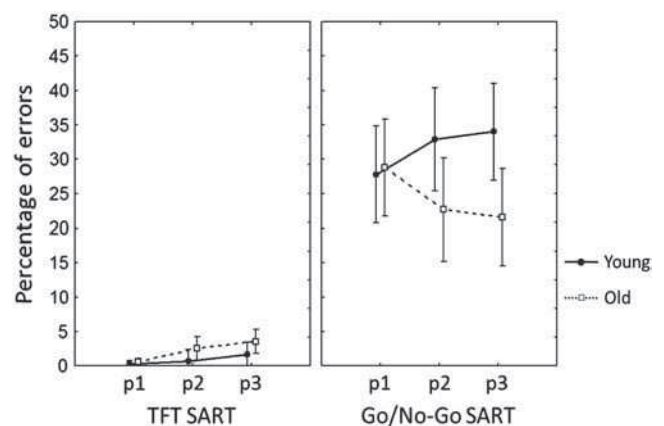


Fig. 1. Interaction between age (young/old), task (TFT SART/Go/No-Go SART) and period (p1/p2/p3) on the percentage of errors. Vertical bars represent 95% confidence intervals.

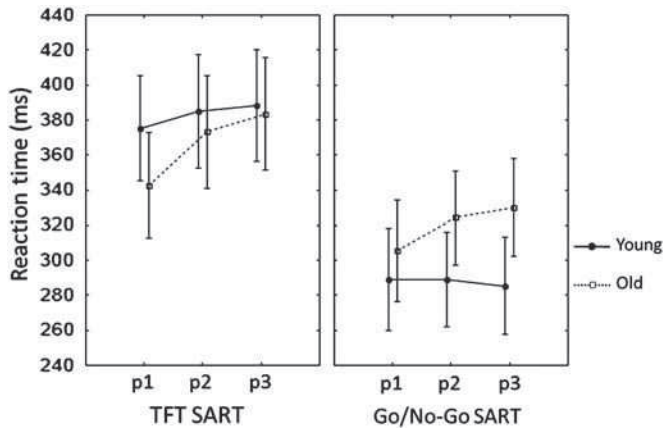


Fig. 2. Interaction between age (young/old), task (TFT SART/Go/No-Go SART) and period (p1/p2/p3) on mean reaction times. Vertical bars represent 95% confidence intervals.

more TUTs than older adults ($M = 0.78$, $SD = 0.07$). A main effect of task was also found ($F(1,58) = 6.93$, $p < .02$, partial $\eta^2 = 0.11$): subjects reported more TUTs after the Go/No-Go SART ($M = 0.99$, $SD = 0.05$) than after the TFT SART ($M = 0.87$, $SD = 0.06$). No interaction between age and task ($F(1,58) = 1.61$, $p = .21$, partial $\eta^2 = 0.03$) was found.

3.2.3. NASA-TLX

3.2.3.1. Mental demand. The ANOVA revealed a main effect of task ($F(1,58) = 16.77$, $p < .001$, partial $\eta^2 = 0.22$): subjects reported the Go/No-Go SART ($M = 12.2$, $SD = 0.56$) to be more mentally demanding than the TFT SART ($M = 9.42$, $SD = 0.68$). No main effect of age ($F(1,58) = 0.03$, $p = .86$, partial $\eta^2 < 0.001$) or interaction between age and task ($F(1,58) = 1.19$, $p = .28$, partial $\eta^2 = 0.02$) was found.

3.2.3.2. Physical demand. No significant main effect of age ($F(1,58) = 3.61$, $p = .12$, partial $\eta^2 = 0.04$), task ($F(1,58) = 0.06$, $p = .80$, partial $\eta^2 = 0.001$), or interaction between age and task ($F(1,58) = 2.28$, $p = .14$, partial $\eta^2 = 0.04$) was found.

3.2.3.3. Temporal demand. The ANOVA revealed a main effect of task ($F(1,58) = 9.9$, $p < .003$, partial $\eta^2 = 0.15$): subjects felt more time pressure on the Go/No-Go SART ($M = 10.03$, $SD = 0.72$) than on the TFT SART ($M = 8.23$, $SD = 0.67$). No main effect of age ($F(1,58) = 0.99$,

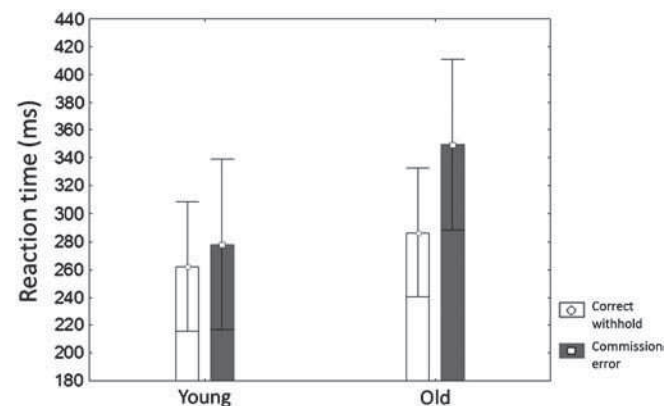


Fig. 3. Interaction between age (young/old) and type of response on No-Go trials (correct withhold/commission error) on mean reaction times on Go trials immediately following No-Go trials. Vertical bars represent 95% confidence intervals.

Table 2

Results of the ANOVA performed on mean reaction times on Go trials immediately following No-Go trials.

Effect	Degree of freedom	F	p	η^2_p
Age	1, 56	5.78	<.02	0.09
Type of response on No-Go trial	1, 56	18.08	<.001	0.24
Age * Type of response on No-Go trial	1, 56	6.42	<.02	0.10
Period	2, 112	0.99	.37	0.02
Age * Period	2, 112	4.33	<.02	0.07
Type of response on No-Go trial * Period	2, 112	7.3	<.002	0.12
Age * Type of response on No-Go trial * Period	2, 112	0.28	.73	0.005

$p = .32$, partial $\eta^2 = 0.02$) or interaction between age and task ($F(1,58) = 0.34$, $p = .56$, partial $\eta^2 = 0.006$) was found.

3.2.3.4. Performance. The ANOVA revealed two main effects, age ($F(1,58) = 13.21$, $p < .001$, partial $\eta^2 = 0.19$) and task ($F(1,58) = 30.74$, $p < .001$, partial $\eta^2 = 0.35$). Older adults ($M = 7.4$, $SD = 0.62$) evaluated their performance as more successful than younger adults ($M = 10.6$, $SD = 0.62$), and participants evaluated their performance as being more successful in the TFT SART ($M = 7.08$, $SD = 0.05$) than in the Go/No-Go SART ($M = 10.98$, $SD = 0.62$). No interaction between age and task ($F(1,58) = 0.11$, $p = .74$, partial $\eta^2 = 0.002$) was found.

3.2.3.5. Effort. The ANOVA revealed a main effect of task ($F(1,58) = 6.17$, $p < .02$, partial $\eta^2 = 0.10$): subjects felt the Go/No-Go SART required more effort ($M = 11.7$, $SD = 0.05$) than the TFT SART ($M = 9.97$, $SD = 0.62$). The effect of age reached a statistical trend level ($F(1,58) = 3.24$, $p = .08$, partial $\eta^2 = 0.05$): younger adults tended to report a higher level of effort to achieve performance ($M = 11.6$, $SD = 0.63$) than older subjects ($M = 10$, $SD = 0.63$). No interaction between age and task ($F(1,58) = 0.91$, $p = .34$, partial $\eta^2 = 0.02$) was found.

3.2.3.6. Frustration. The ANOVA revealed two main effect, age ($F(1,58) = 6.85$, $p < .02$, partial $\eta^2 = 0.11$) and task ($F(1,58) = 13.39$, $p < .001$, partial $\eta^2 = 0.19$). Younger adults ($M = 9.87$, $SD = 0.68$) felt more frustrated than older adults ($M = 7.37$, $SD = 0.68$), and subjects felt more frustrated after the Go/No-Go SART ($M = 9.95$, $SD = 0.61$) than after the TFT SART ($M = 7.28$, $SD = 0.59$). No interaction between age and task ($F(1,58) = 0.3$, $p = .59$, partial $\eta^2 = 0.005$) was found.

4. Discussion

This study was designed to evaluate sustained attention ability in older adults, by using the two different approaches cited in the literature to study it (responding to infrequent targets versus inhibiting ongoing behavior), since available results on this topic do not provide a definitive answer on whether this ability is deteriorated or preserved during normal aging. To answer this question, we used, in a within-subjects design, two versions of the same task (the SART) in which only the response mode differed (responding to rare targets and withholding a response to frequent non-targets in the TFT SART versus responding to frequent non-targets and withholding a response to rare targets in the Go/No-Go SART). Based on data cited in the literature, we hypothesized a vigilance decrement characterized by a decrease in accuracy over time in both versions, with a more pronounced performance decrement in older subjects than in younger on the TFT SART and, conversely, a more pronounced performance decrement in younger than in older subjects on the Go/No-Go SART.

On the behavioral level, although no main effect of age on performance (accuracy and speed) was evidenced, as hypothesized, our data highlighted a vigilance decrement (characterized by an increase in errors over time) in both versions of the task but, mainly a triple interaction between age, task and period on accuracy. In accordance with our

hypothesis, this interaction indicated that only older adults exhibited a vigilance decrement on the TFT SART, but that only younger subjects evidenced a vigilance decrement on the Go/No-Go SART, whereas the performance of the older adults improved over the course of the task. The vigilance decrement on the TFT SART observed in older adults, evidenced by both an increase in omission errors and an increase in reaction times throughout the watch-keeping period, is in line with previous reports showing similar decreases in the hit rate or increases in response time with time on task (Bunce, 2001; Deaton & Parasuraman, 1993; Mouloua & Parasuraman, 1995; Parasuraman & Giambra, 1991; Thackray & Touchstone, 1981). In these studies, which notably used resource-taxing task parameters or perceptually degraded stimuli, explanations related to older adults' limited attentional resources (Craik & Byrd, 1982) and to sensory-processing difficulties inherent in advancing age (Baltes & Lindenberger, 1997) are typically put forward to account for age-related deterioration in vigilance performance. However, these accounts cannot explain our results, which are more likely explained by an age-related difference in arousal level, as several studies have shown that older individuals are under-aroused compared to younger subjects (Sanford & Maule, 1971; Tune, 1966; Welford, 1965). Since the level of arousal is known to interact with attentional performance (Parasuraman, 1998; Sarter et al., 2001), it is possible that the more pronounced vigilance decrement in our seniors in the TFT SART is the result of the absence of "arousal"-inducing stimuli to trigger bottom-up attentional processing (Sarter et al., 2001). On the other hand, on the Go/No-Go SART, our results clearly showed better sustained attention performance by older subjects than by the younger subjects: accuracy improved throughout the task in the older group but decreased in the younger group. This result is in accordance with a few recent studies showing that older adults show a lower vigilance decrement (Brache et al., 2010; Carriere et al., 2010) or greater overall vigilance (Jackson & Balota, 2012) than younger adults, which can be accounted for in several ways. First, as evidenced by the increase in their reaction times throughout the Go/No-Go SART (whereas reaction times remained stable in the younger group), older adults may have adopted a more cautious response strategy in order to avoid errors (Hertzog, Vernon, & Rympha, 1993; Salthouse, 1979; Smith & Brewer, 1995). This age-related difference in speed-accuracy trade-off, evidenced in other studies (Endrass, Schreiber, & Kathmann, 2012; Falkenstein, Hoormann, & Hohnsbein, 2001; Hoffmann & Falkenstein, 2011; Mathalon et al., 2003) has been interpreted as an enhanced engagement of cognitive control in the elderly (Hester, Fassbender, & Garavan, 2004; Rypma & D'Esposito, 2001; Sharp, Scott, Mehta, & Wise, 2006; Simoes-Franklin, Hester, Shpaner, Foxe, & Garavan, 2009). Indeed, several types of indicators suggest that among cognitive control mechanisms, performance and error monitoring are more recruited in the elderly than in younger people, thus partially explaining the improved sustained attention performance of older people (Endrass et al., 2012; Hoffmann & Falkenstein, 2011). One of these indicators is the post-error slowing phenomenon, which refers to a slowing in reaction time in trials following an error. We observed post-error slowing only in our older group, which is consistent with an age-related increase in the recruitment of cognitive control mechanisms. Besides, this result is in line with several studies that found post-error slowing to be much greater in the elderly than in young individuals (Band & Kok, 2000; Jackson & Balota, 2012). In the same way, in older adults, neuroimaging and electrophysiological studies evidenced greater activation of the cortical regions involved in cognitive control (anterior cingulate cortex and pre-supplementary motor area) (Hester et al., 2004; Nielson, Langenecker, & Garavan, 2002) and enhanced amplitude of the event-related potential component following correct responses, the correct response negativity (CRN), which reflects monitoring processes (Eppinger, Kray, Mock, & Mecklinger, 2008; Pietschmann, Endrass, & Kathmann, 2011; Pietschmann, Simon, Endrass, & Kathmann, 2008; Schreiber, Pietschmann, Kathmann, & Endrass, 2011).

On the subjective level, our data showing that older subjects reported fewer task unrelated thoughts (TUTs) and were more motivated than younger participants also helped advance our understanding of our behavioral results. Indeed, other studies on this topic also revealed that older adults self-report less mind-wandering (Cheyne et al., 2006; Giambra, 1989) and are more capable of inhibiting TUTs than younger adults (Giambra, 1989; Jackson & Balota, 2012; Smallwood et al., 2004). The greater motivation and interest they displayed, even in tasks particularly conducive of boredom (Thackray & Touchstone, 1981) may account for their relatively low levels of reported mind wandering (Jackson & Balota, 2012) and positively affect cognitive performance (Forstmeier & Maercker, 2008; Hess, Emery, & Neupert, 2012; Ryan, La Guardia, Solky-Butzel, Chirkov, & Kim, 2005; Vallerand, O'Connor, & Hamel, 1995), as evidenced in our study. Concerning age differences in the subjective workload imposed by the tasks, our older group reported less frustration than younger subjects and viewed their performance as more successful than their younger counterparts, which is in line with results of previous studies (Bunce & Sisa, 2002; Deaton & Parasuraman, 1993). But contrary to Bunce and Sisa (2002), we did not observe any age difference in the subjective reports concerning the mental, temporal and physical demands of the tasks. This suggests that the superior performance achieved by our older participants in the Go/No-Go SART is not the consequence of compensatory processes engaged in response to increased demands placed on attentional resources. On the contrary, older adults actually reported that they invested a marginally lower level of effort to achieve performance than young subjects.

Finally, as a whole, our results clearly showed that the age differences in sustained attention ability we observed depended on the approach used, as evidenced by a main effect of task on the majority of our behavioral and subjective indicators. These differences reflect discrepancies in the literature on the subject and also raise the question of the specificities of the two approaches to study sustained attention, especially regarding the nature of errors. From the point of view of speed, for example, our reaction times were generally faster in the Go/No-Go SART than in the TFT SART. This result is consistent with the idea that sustained attention tasks that require inhibiting an ongoing behavior (i.e. responding to frequent non-targets and withholding a response to rare targets) more likely lead to the build-up of a feed-forward motor routine (Helton et al., 2005), making the subject respond in an automatic and mindless manner, and consequently at a faster pace than in the case of a controlled and mindful responding mode. As a corollary, from the point of view of accuracy, our data showed that the Go/No-Go SART was associated with a higher error rate (commission errors) than the TFT SART (omission errors). From a subjective point of view, it was also associated with a higher rate of TUTs, with more reports of mental demand, time pressure and frustration, as well as with the subjective impression that performance in the Go/No-Go SART was both less successful and required more effort than in the TFT SART. As a consequence, if both types of errors (commission and omission) are assumed to be indicative of sustained attention failures, they may not be of the same nature, as previously suggested in the literature. As, unlike the TFT, the Go/No-Go is a compound measure of both response inhibition and sustained attention, the majority of the errors in the Go/No-Go may actually be due to response inhibition failures, not to sustained attention (Carter, Russell, & Helton, 2013; Helton, Kern, & Walker, 2009; O'Connell et al., 2009; Stevenson et al., 2011). If this is the case, in our study, the better performance by seniors compared to that of juniors in the Go/No-Go SART is in agreement with several reports regarding age differences in inhibition. First, considering that the Go/No-Go SART is sensitive to impulsive responding (Helton, 2009), the higher error rates in young adults could be partly explained by the fact that they are generally more impulsive than their older counterparts. Secondly, our results are also in line with several recent studies showing that the performance of older subjects in Go/No-Go tasks did not differ from the performance of younger participants, suggesting the preservation of inhibitory motor control with age (Grandjean & Collette,

2011; Rush, Barch, & Braver, 2006; Sagaspe et al., 2012; Staub, Doignon-Camus, Bacon, & Bonnefond, under review; Vallesi, 2011). As a consequence, further studies to identify the nature of attention failures and their underlying mechanisms in these two approaches could provide even more precise knowledge on the effects of normal aging on sustained attention ability.

References

- Baltes, P. B., & Lindenberger, U. (1997). Emergence of a powerful connection between sensory and cognitive functions across the adult life span: A new window to the study of cognitive aging? *Psychology Aging*, *12*(1), 12–21.
- Band, G. P., & Kok, A. (2000). Age effects on response monitoring in a mental-rotation task. *Biological Psychology*, *51*(2–3), 201–221.
- Berardi, A.M., Parasuraman, R., & Haxby, J. V. (2001). Overall vigilance and sustained attention decrements in healthy aging. *Experimental Aging Research*, *27*(1), 19–39.
- Brache, K., Scialfa, C., & Hudson, C. (2010). Aging and vigilance: Who has the inhibition deficit? *Experimental Aging Research*, *36*(2), 140–152.
- Bunce, D. (2001). Age differences in vigilance as a function of health-related physical fitness and task demands. *Neuropsychologia*, *39*(8), 787–797.
- Bunce, D., & Sisa, L. (2002). Age differences in perceived workload across a short vigil. *Ergonomics*, *45*(13), 949–960.
- Carriere, J. S., Cheyne, J. A., Solman, G. J., & Smilek, D. (2010). Age trends for failures of sustained attention. *Psychology and Aging*, *25*(3), 569–574.
- Carter, L., Russell, P. N., & Helton, W. S. (2013). Target predictability, sustained attention, and response inhibition. *Brain and Cognition*, *82*(1), 35–42.
- Cheyne, J. A., Carriere, J. S., & Smilek, D. (2006). Absent-mindedness: Lapses of conscious awareness and everyday cognitive failures. *Consciousness and Cognition*, *15*(3), 578–592.
- Craik, F. I. M., & Byrd, M. (1982). Aging and cognitive deficits: The role of attentional resources. In F. I. M. Craik, & S. Trehub (Eds.), *Aging and cognitive processes*. New York: Plenum Press.
- Craik, F. I. M., & Salthouse, T. A. (2008). *Handbook of cognitive aging* (3rd ed.) New York: Psychology Press.
- Davies, D. R., & Parasuraman, R. (1982). *The psychology of vigilance*. London, New York: Academic Press.
- Deaton, J. E., & Parasuraman, R. (1993). Sensory and cognitive vigilance: Effects of age on performance and subjective workload. *Human Performance*, *6*, 71–97.
- Dockree, P.M., Bellgrove, M.A., O'Keefe, F. M., Moloney, P., Aimola, L., Carton, S., et al. (2006). Sustained attention in traumatic brain injury (TBI) and healthy controls: Enhanced sensitivity with dual-task load. *Experimental Aging Research*, *168*(1–2), 218–229.
- Dockree, P.M., Kelly, S. P., Roche, R. A., Hogan, M. J., Reilly, R. B., & Robertson, I. H. (2004). Behavioural and physiological impairments of sustained attention after traumatic brain injury. *Cognitive Brain Research*, *20*, 403–414.
- Endrass, T., Schreiber, M., & Kathmann, N. (2012). Speeding up older adults: Age-effects on error processing in speed and accuracy conditions. *Biological Psychiatry*, *89*, 426–432.
- Eppinger, B., Kray, J., Mock, B., & Mecklinger, A. (2008). Better or worse than expected? Aging, learning, and the ERN. *Neuropsychologia*, *46*(2), 521–539.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., & Hohnsbein, J. (2001). Changes of error-related ERPs with age. *Experimental Aging Research*, *138*(2), 258–262.
- Forstmeier, S., & Maercker, A. (2008). Motivational reserve: Lifetime motivational abilities contribute to cognitive and emotional health in old age. *Psychology and Aging*, *23*(4), 886–899.
- Giambra, L. M. (1989). Task-unrelated-thought frequency as a function of age: A laboratory study. *Psychology and Aging*, *4*(2), 136–143.
- Giambra, L. M., Camp, C. J., & Grodsky, A. (1992). Curiosity and stimulus seeking across the adult life span. *Psychology and Aging*, *7*, 150–157.
- Glisky, E. L. (2007). Changes in cognitive function in human aging. In D. R. Riddle (Ed.), *Brain aging: Models, methods and mechanisms*. New York: CRC.
- Grady, C. L. (2008). Cognitive neuroscience of aging. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1124*, 127–144.
- Grandjean, J., & Collette, F. (2011). Influence of response prepotency strength, general working memory resources, and specific working memory load on the ability to inhibit predominant responses: A comparison of young and elderly participants. *Brain and Cognition*, *77*(2), 237–247.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock, & N. Meshkati (Eds.), *Human mental workload* (pp. 139–183). Amsterdam: North-Holland.
- Helton, W. S. (2009). Impulsive responding and the sustained attention to response task. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *31*, 39–47.
- Helton, W. S., Hollander, T. D., Warm, J. S., Matthews, G., Dember, W. N., Wallart, M., et al. (2005). Signal regularity and the mindlessness model of vigilance. *British Journal of Psychology*, *96*, 249–261.
- Helton, W. S., Kern, R. P., & Walker, D. R. (2009). Conscious thought and the sustained attention to response task. *Consciousness and Cognition*, *18*(3), 600–607.
- Helton, W. S., Shaw, T. H., Warm, J. S., Matthews, G., Dember, W. N., & Hancock, P. A. (2004). Workload transitions: Effects on vigilance performance, and stress. In D. A. Vincenzi, M. Mouloua, & P. A. Hancock (Eds.), *Human performance, situation awareness and automation current research and trends*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Hertzog, C., Vernon, M. C., & Rympha, B. (1993). Age differences in mental rotation task performance: The influence of speed/accuracy tradeoffs. *Journal of Gerontology*, *48*, P150–P156.
- Hess, T. M., Emery, L., & Neupert, S. D. (2012). Longitudinal relationships between resources, motivation, and functioning. *Journals of Gerontology. Series B, Psychological Sciences and Social Sciences*, *67*(3), 299–308.
- Hester, R., Fassbender, C., & Garavan, H. (2004). Individual differences in error processing: A review and reanalysis of three event-related fMRI studies using the Go/No-Go task. *Cerebral Cortex*, *14*, 986–994.
- Hoffmann, S., & Falkenstein, M. (2011). Aging and error processing: Age related increase in the variability of the error-negativity is not accompanied by increase in response variability. *PLoS One*, *6*(2), e17482.
- Jackson, J.D., & Balota, D. A. (2012). Mind-wandering in younger and older adults: Converging evidence from the Sustained Attention to Response Task and reading for comprehension. *Psychology and Aging*, *27*(1), 106–119.
- Mackworth, N. H. (1948). The breakdown of vigilance during prolonged visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *1*, 6–21.
- Mackworth, N. H. (1957). Some factors affecting vigilance. *Advancement of Science*, *53*, 389–393.
- Manly, T., Davidson, B., Gaynard, B., Greenfield, E., Heutniki, J., & Parr, A. (2004). An electronic knot in the handkerchief: 'Content free cueing' and the maintenance of attentional control. *Neuropsychological Rehabilitation*, *14*, 89–116.
- Manly, T., Robertson, I. H., Galloway, M., & Hawkins, K. (1999). The absent mind: Further investigations of sustained attention to response. *Neuropsychologia*, *37*, 661–670.
- Mathalon, D. H., Bennett, A., Askari, N., Gray, E. M., Rosenbloom, M. J., & Ford, J. M. (2003). Response-monitoring dysfunction in aging and Alzheimer's disease: An event-related potential study. *Neurobiology of Aging*, *24*(5), 675–685.
- Matthews, G., Joyner, L., Gilliland, K., Campbell, S. E., Falconer, S., & Huggins, J. (1999). Validation of a comprehensive stress state questionnaire: Towards a state 'Big Three'? In I. Mervielde, I. J. Deary, F. De Fruyt, & F. Ostendorf (Eds.), *Personality psychology in Europe*, Vol. 7. (pp. 335–350) Tilburg, the Netherlands: Tilburg University Press.
- McAvinue, L. P., Habekost, T., Johnson, K. A., Kyllingsbæk, S., Vangkilde, S., Bundesen, C., et al. (2012). Sustained attention, attentional selectivity, and attentional capacity across the lifespan. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *74*(8), 1570–1582.
- Mouloua, M., & Parasuraman, R. (1995). Aging and cognitive vigilance: Effects of spatial uncertainty and event rate. *Experimental Aging Research*, *21*(1), 17–32.
- Neal, G. L., & Pearson, R. G. (1966). Comparative effects of age, sex, and drugs upon two tasks of auditory vigilance. *Perceptual & Motor Skills*, *23*, 967–974.
- Nielson, K. A., Langenecker, S. A., & Garavan, H. (2002). Differences in the functional neuroanatomy of inhibitory control across the adult life span. *Psychology and Aging*, *17*, 56–71.
- O'Connell, R. G., Bellgrove, M.A., Dockree, P., Lau, A., Fitzgerald, M., & Robertson, I. H. (2008). Self-Alert Training: Volitional modulation of autonomic arousal improves sustained attention. *Neuropsychologia*, *46*(5), 1379–1390.
- O'Connell, R. G., Dockree, P.M., Bellgrove, M.A., Turin, A., Ward, S., Foxe, J. J., et al. (2009). Two types of action error: Electrophysiological evidence for separable inhibitory and sustained attention neural mechanisms producing error on go/no-go tasks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *21*(1), 93–104.
- Parasuraman, R. (1986). Vigilance, monitoring, and search. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance. Cognitive processes and performance*, Vol. II. New York: Wiley.
- Parasuraman, R. (1998). *The attentive brain*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Parasuraman, R., & Giambra, L. (1991). Skill development in vigilance: Effects of event rate and age. *Psychology and Aging*, *6*(2), 155–169.
- Parasuraman, R., Nestor, P., & Greenwood, P. (1989). Sustained-attention capacity in young and older adults. *Psychology and Aging*, *4*(3), 339–345.
- Pietschmann, M., Endrass, T., & Kathmann, N. (2011). Age-related alterations in performance monitoring during and after learning. *Neurobiology of Aging*, *32*(7), 1320–1330.
- Pietschmann, M., Simon, K., Endrass, T., & Kathmann, N. (2008). Changes of performance monitoring with learning in older and younger adults. *Psychophysiology*, *45*(4), 559–568.
- Raven, J. C., & Court, J. H. (1998). *Advanced progressive matrices*. Oxford: Oxford Psychologists Press.
- Robertson, I. H., Manly, T., Andrade, J., Baddeley, B. T., & Yiend, J. (1997). 'Oops!': Performance correlates of everyday attentional failures in traumatic brain injured and normal subjects. *Neuropsychologia*, *35*(6), 747–758.
- Rush, B. K., Barch, D.M., & Braver, T. S. (2006). Accounting for cognitive aging: Context processing, inhibition or processing speed? *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *13*(3–4), 588–610.
- Ryan, R. M., La Guardia, J. G., Solyk-Butzel, J., Chirkov, V., & Kim, Y. (2005). On the interpersonal regulation of emotions: Emotional reliance across gender, relationships, and cultures. *Personal Relationships*, *12*(1), 145–163.
- Rypma, B., & D'Esposito, M. (2001). Age-related changes in brain-behavior relationships: Evidence from event-related functional MRI studies. *European Journal of Cognitive Psychology*, *13*, 235–256.
- Sagaspe, P., Taillard, J., Amiéva, H., Beck, A., Rascol, O., Dartigues, J. F., et al. (2012). Influence of age, circadian and homeostatic processes on inhibitory motor control: A Go/Nogo task study. *PLoS One*, *7*(6), e39410.
- Salthouse, T. A. (1979). Adult age and the speed-accuracy trade-off. *Ergonomics*, *22*, 811–821.
- Salthouse, T. A. (1991). *Theoretical perspectives on cognitive aging*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Sanford, A. J., & Maule, A. J. (1971). Age and the distribution of observing response. *Psychonomic Science*, *23*, 264–267.
- Sarter, M., Givens, B., & Bruno, J. P. (2001). The cognitive neuroscience of sustained attention: Where top-down meets bottom-up. *Brain Research Reviews*, *35*(2), 146–160.
- Schreiber, M., Pietschmann, M., Kathmann, N., & Endrass, T. (2011). ERP correlates of performance monitoring in elderly. *Brain and Cognition*, *76*(1), 131–139.
- Sharp, D. J., Scott, S. K., Mehta, M.A., & Wise, R. J. (2006). The neural correlates of declining performance with age: Evidence for age-related changes in cognitive control. *Cerebral Cortex*, *16*(12), 1739–1749.

- Simoies-Franklin, C., Hester, R., Shpaner, M., Foxe, J. J., & Garavan, H. (2009). Executive function and error detection: The effect of motivation on cingulate and ventral striatum activity. *Human Brain Mapping, 31*, 458–469.
- Smallwood, J., Davies, J. B., Heim, D., Finnigan, F., Sudberry, M. V., O'Connor, R. C., et al. (2004). Subjective experience and the attentional lapse. Task engagement and disengagement during sustained attention. *Consciousness and Cognition, 4*, 657–690.
- Smallwood, J., Obonsawin, M. C., & Heim, S. D. (2003). Task unrelated thought: The role of distributed processing. *Consciousness and Cognition, 12*(2), 169–189.
- Smith, G. A., & Brewer, N. (1995). Slowness and age: Speed-accuracy mechanisms. *Psychology and Aging, 10*, 238–247.
- Staub, B., Doignon-Camus, N., Bacon, E., & Bonnefond, A. (2013). *The effects of aging on sustained attention ability: An ERP study.* (under review).
- Staub, B., Doignon-Camus, N., Després, O., & Bonnefond, A. (2012). Sustained attention in the elderly: What do we know and what does it tell us about cognitive aging? *Ageing Research Reviews, 12*, 459–468.
- Stevenson, H., Russell, P. N., & Helton, W. S. (2011). Search asymmetry, sustained attention, and response inhibition. *Brain and Cognition, 20*, 1732–1737.
- Surwillo, W. W., & Quilter, R. E. (1964). Vigilance, age, and response-time. *American Journal of Psychology, 77*, 614–620.
- Thackray, R. I., & Touchstone, R. M. (1981). *Age-related differences in complex monitoring performance. (FAA-AM-81-12).* Oklahoma City: FAA civil Aeromedical Institute.
- Tompsonowski, P. D., & Tinsley, V. F. (1996). Effects of memory demand and motivation on sustained attention in young and older adults. *American Journal of Psychology, 109*(2), 187–204.
- Tune, G. S. (1966). Errors of commission as a function of age and temperament in a type of vigilance task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 18*(4), 358–361.
- Vallerand, R. J., O'Connor, B. P., & Hamel, M. (1995). Motivation in later life: Theory and assessment. *International Journal of Aging and Human Development, 41*(3), 221–238.
- Vallesi, A. (2011). Targets and non-targets in the aging brain: A go/nogo event related potential study. *Neuroscience Letters, 487*, 313–317.
- Warm, J. S. (1984). An introduction to vigilance. In J. S. Warm (Ed.), *Sustained attention in human performance.* Chichester [West Sussex], New York: Wiley.
- Warm, J. S. (1993). Vigilance and target detection. In B.M. Huey, & C. D. Wickens (Eds.), *Workload transition implications for individual and team performance.* Washington, DC: National Academy Press.
- Welford, A. T. (1965). Performance, biological mechanisms and age: A theoretical sketch. In A. T. Welford, & J. E. Birren (Eds.), *Behaviour, aging and the Nervous System.* Springfield, IL: Charles C. Thomas.

Rappel des résultats principaux de l'étude 1 et objectifs de l'étude 2

Notre premier objectif (étude 1) était d'évaluer les effets du vieillissement normal sur les capacités d'attention soutenue en utilisant les deux approches décrites dans la littérature :

- l'approche traditionnelle, selon laquelle l'attention soutenue renvoie au maintien d'un état de préparation pour détecter et répondre au long cours à certains changements survenant de façon imprévisible dans l'environnement, et qui repose sur l'utilisation de tâches de détection nécessitant de la part du sujet de répondre à l'apparition de stimuli cibles rares ;
- l'approche plus récente, dans laquelle l'attention soutenue est définie comme la capacité à inhiber une réponse bien apprise à de rares occasions, et qui évalue l'attention soutenue par le biais de tâches d'inhibition dans lesquelles le sujet doit répondre à l'apparition de stimuli non-cibles fréquents et ne pas répondre à l'apparition de stimuli cibles rares.

Les résultats obtenus à l'issue de cette étude mettent en évidence, en accord avec nos hypothèses, des effets clairement différenciés de l'âge sur les capacités d'attention soutenue selon l'approche utilisée pour les évaluer. Ces résultats comportementaux indiquent d'une part, une altération des capacités d'attention soutenue chez les sujets âgés dans la tâche de détection (SART TFT) et d'autre part, une préservation de ces capacités dans la tâche d'inhibition (SART Go/No-Go) (les résultats inverses ont été obtenus chez les sujets jeunes : préservation des capacités d'attention soutenue dans la SART TFT, et altération dans la SART Go/No-Go).

A l'issue de cette étude, plusieurs hypothèses explicatives ont été formulées pour tenter de rendre compte des effets contradictoires obtenus chez les sujets âgés : l'absence de stimuli suffisamment éveillant pour activer de façon bottom-up les processus attentionnels dans la tâche de détection traditionnelle et une activation top-down plus

importante des mécanismes de contrôle attentionnel dans la tâche d'inhibition. En effet, plusieurs indicateurs comportementaux (ralentissement post-erreur et stratégie de réponse reflétée par le compromis vitesse/précision) associés aux mécanismes de contrôle cognitif suggèrent un engagement du contrôle cognitif plus important chez les sujets âgés dans la tâche d'inhibition. Sur cette base, notre second objectif (étude 2) a donc été d'examiner si une utilisation différente chez les sujets jeunes et âgés des processus automatiques et contrôlés en situation d'attention soutenue pouvait rendre compte des résultats comportementaux obtenus. A cette fin, en nous appuyant sur des mesures de potentiels évoqués, nous avons étudié le déroulement temporel des processus automatiques et contrôlés dans chacune de ces deux approches et pour chacun de nos groupes d'âge.

Etude 2

Staub, B., Doignon-Camus, N., Bacon, E., & Bonnefond, A. (under review). Age-related differences in the use of automatic and controlled processes in a situation of sustained attention. *Neurobiology of Aging*.

Age-related differences in the use of automatic and controlled processes in a
situation of sustained attention

Bérengère Staub, Nadège Doignon-Camus, Élisabeth Bacon & Anne Bonnefond

INSERM U1114, Pôle de Psychiatrie, Hôpital Civil de Strasbourg, France

Corresponding author: Bérengère Staub

Unité INSERM 1114, Pôle de Psychiatrie, Hôpital Civil de Strasbourg

1 place de l'Hôpital, 67091 Strasbourg Cedex, France

E-mail : berengere.staub@etu.unistra.fr

Tel: +33 3 88 11 64 45, Fax: +33 3 88 11 64 46

Abstract

Previous studies examining sustained attention ability in older adults have yielded inconsistent results: deterioration in studies using traditionally formatted tasks (TFT), in which subjects have to respond to rare targets, and preservation in studies using Go/No-Go tasks, in which subjects have to withhold response to rare targets. The purpose of this study was to examine whether these discrepancies could be explained by a differential use of automatic and controlled processes according to age. To that end, we used two versions of the same task, which only differed in their response mode (TFT, Go/No-Go), and the event-related potential (ERP) technique. Older adults exhibited a vigilance decrement in the TFT SART, while their performance actually improved in the Go/No-Go SART. In both tasks, ERP results notably evidenced increased P2s and non-target P3s in older adults, components related to the allocation of attentional resources. Altogether, our results suggest that in both tasks older adults adopted a controlled processing mode, which resulted in opposite effects on performance according to the nature of the task.

Keywords: aging, vigilance, time-on-task, SART

1. Introduction

Performance on a sustained attention task has been described as relying on the interplay between two types of processing mechanisms, namely automatic and controlled processes (Fisk & Schneider, 1981; Norman & Shallice, 1986; Stuss et al., 1995). Automatic processes are involved in the execution of routine actions, which, being performed in a stimulus-driven, exogenous or “bottom-up” manner, require little or no effortful control. On the opposite, controlled processes are required to construct novel responses, to inhibit ongoing behavior or to modulate action selection when behavior is no longer appropriate, and thus this “top-down”, endogenous control over action is experienced subjectively as effortful and conscious attention (Datta et al., 2007; Manly et al., 1999; Norman & Shallice, 1986; Shallice, 1988).

The two existing approaches that have been used to examine sustained attention have put forward specific definitions of this ability and particular methods to study it. These methods notably differ in the extent to which they involve automatic and controlled processes. Originally, sustained attention was defined as a state of readiness to detect and respond to certain changes in the environment occurring at random time intervals over prolonged periods of time (Davies & Parasuraman, 1982; Mackworth, 1957; Parasuraman, 1986). Accordingly, “traditionally formatted tasks” (TFTs) are detection tasks which require the subject to monitor a continuous stream of stimuli for a prolonged period, and to make an overt response on the rare occasions a target stimulus is presented (Grier et al., 2003; Mackworth, 1948; Stevenson et al., 2011). In such tasks, it is assumed that an automation of the simple target-response relationship occurs early into the task, and thus rapidly reduces the need for controlled attention over action (Manly et al., 1999). A second, more recent approach redefined sustained attention as the ability to inhibit a well-learned response on rare occasions, and introduced the Sustained Attention to Response Task as a new way to study it (Robertson et al., 1997). The SART is a Go/No-Go paradigm which consists in the random presentation of digits from 1 to 9, and requires the participant to respond to all the digits except for “3”. In such tasks, a rapid automation of response is also established but it is redirected at the frequent non-targets (digits 1, 2, 4-9), and therefore participants must try to counter the tendency to lapse into routine responding and maintain a high degree of

controlled attention over action, so that response inhibition is successful upon the occurrence of a target (Manly et al., 1999). To summarize, maintaining a stable level of performance with time on task mostly relies on the activation of automatic processes in TFTs, while successful performance in Go/No-Go tasks requires the sustained activation of controlled processes over time.

While several results have examined age-related changes in sustained attention performance, only a limited number of studies have examined the effects of age, on the one hand, and the effect of time on task, on the other hand, on automatic and controlled processes. Regarding the effects of time on task on these processes, it has been shown that controlled processing was the most vulnerable to time on task, and it has actually been viewed as the locus of the vigilance decrement (Fisk & Schneider, 1981; Pattyn & Soetens, 2004). Concerning the effect of age on automatic and controlled processes, studies that examined these processes in relation to memory ability have shown that some memory differences with age are due to declines in controlled, but not automatic, processes (Amenedo & Diaz, 1998; Fisk et al., 1990; Hasher & Zacks, 1979; Jennings & Jacoby, 1993; Titov & Knight, 1997). However, contrary results have emerged from studies that examined automatic and controlled aspects of perceptual abilities (in the visual and the auditory modality) in aging. Indeed, these studies typically showed that older adults emphasized top-down, controlled attention to a greater degree than younger adults, possibly to compensate for declines in overall bottom-up sensory input that prevent stimuli to be encoded automatically (Ford et al., 1995, 1997; Madden et al., 2004). Furthermore, in line with the notion that individuals rely increasingly on controlled processes with age, Daffner and colleagues showed that in an oddball task, cognitively high-performing older adults allocated substantially more resources to standard stimuli than their younger counterparts (as reflected by increased amplitudes of the P3 component of event related potentials). These results suggested that in their older participants, the adoption of a controlled processing mode did not depend on stimulus type but rather reflected the way they approached the task in general (Daffner et al., 2005; Riis et al., 2008).

Based on those data, the effects of age on automatic and controlled processing could explain the contradictory pattern of results that has emerged regarding the effect of age on

sustained attention, i.e. an age-related deterioration of this ability reported by studies using TFTs, and a preservation of this ability with age reported by studies using Go/No-Go tasks (Staub et al., 2013, 2014). In other words, discrepancies regarding the effect of age on sustained attention performance in each approach could be explained by a differential use of automatic and controlled processes as a function of age in a situation of sustained attention. For example, recent results showed that in a long-lasting Go/No-Go sustained attention task, older adults deployed increased levels of attentional control relative to younger subjects (Staub et al., in press). In order to put this possibility to the test, we employed in the current study two versions of the SART which only differed in their response mode – a TFT version, which mostly relies on automatic processes, and the regular Go/No-Go version, which mostly relies on controlled processes, together with the event-related potentials (ERP) technique, allowing us to examine, in a time on task perspective, the automatic or controlled nature of processing adopted by each group in these tasks. Indeed, the attentional requirement of automatic and controlled processing modes has notably been investigated by measuring the P3 component, a sensitive index of the attentional resources allocated to stimulus processing (Isreal et al., 1980; Polich, 1996; Wickens et al., 1983), whose amplitude and/or latency has been shown to decrease in situations demanding automatic rather than controlled processing (Hoffman et al., 1983; Romero & Polich, 1996).

We expected that in both tasks, an automatization of response would occur over the course of the task in younger adults, enabling them to succeed in maintaining a good level of performance in the TFT SART, but not in the Go/No-Go SART, in which the adoption of an automatic response style increases the likelihood of committing errors. On the contrary, we expected older adults to initiate and sustain a high degree of control over response throughout the course of the tasks, enabling them to maintain a stable level of performance in the Go/No-Go SART, but not in the TFT SART, in which maintaining a controlled strategy may be too resource-consuming and thus cause a decrease in performance.

2. Material and methods

2.1. Subjects

Twenty-seven younger (18 females; mean age: 24.4 years; range: 18–29) and 25 older adults (14 females; mean age: 65.5 years; range: 62–71) participated in this experiment. All the subjects declared that they were free of neurological and psychiatric diseases and had normal or corrected-to-normal vision. All subjects gave their written informed consent, and the study protocol was approved by the local Ethics Committee. Each subject participated in one experimental session, which lasted approximately 90 min. Younger and older adults did not differ in their years of education (completed years of school and university education), $t(50)=1.42$, $p = .16$ (younger adults: $M = 15.4$ years, $SD = 2.4$; older adults: $M = 14.5$ years, $SD = 2.3$). Scores on nonverbal intelligence as assessed by Raven's progressive matrices (Raven et al., 1998) under time limited conditions (20 min) did not reveal any significant difference between the two groups, $t(50)=-.22$, $p = .82$ (younger adults: $M = 86.5$, $SD = 10.73$; older adults: $M = 87.2$, $SD = 12.34$).

2.2. Task design and procedure

All participants completed two tasks (30 minutes each), with a 10-min break between the two, and a 2-minute practice period before each task. The order of presentation of the two tasks was counterbalanced within groups. One of the tasks was the sustained attention to response task (SART; Robertson et al., 1997), a Go/No-Go task in which digits ranging from "1" to "9" were presented in a random order. Subjects were instructed to respond as quickly and accurately as possible to the digits with a press on the Control key of the keyboard upon presentation of each digit with the exception of the digit 3, which required response inhibition. Each digit was presented for 150 ms followed by an inter-stimulus interval (ISI) that varied randomly between 1500 and 2500 ms. All digits, including the 3, were presented with equal probability. Five randomly allocated digit sizes were presented to increase the demand for processing the numerical value and to minimize the possibility that subjects would set a search template for some perceptual feature of the target digit ("3"). Digit font sizes were 100, 120, 140, 160 and 180 in Arial font. The five allocated digit sizes

subtended vertical angles of 1.39°, 1.66°, 1.92°, 2.18° and 2.45°, respectively, at a viewing distance of 70 cm. Digits were presented in black, 0.25° above a central yellow fixation cross on a gray background, on a standard 17 inch computer screen. Participants were instructed to focus on the fixation cross during the task in order to minimize eye movements. The second task used only differed in the instructions given to the participant. Subjects were instructed to respond as quickly and accurately as possible only to the digit 3, and to withhold their response upon the presentation of the other digits. As typically in TFTs, the subject has to monitor a continuous stream of stimuli, and make an overt response on the rare occasions a target stimulus is presented. We thus use the term “TFT SART” when referring to the SART using this response mode, and the term “Go/No-Go SART” when referring to the regular SART. Also, for both tasks, we use the term “target” to designate the digit “3” and “non-targets” to designate the other digits (1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, and 9). For each task, stimuli were presented in one block of 810 trials (90 of each of the nine digits) over a period of 30 min.

Prior to starting the first task, participants also completed the motivation component of the Dundee Stress State Questionnaire (DSSQ, Matthews et al., 1999), a 15-item questionnaire that assesses the participant’s motivation to perform the task at hand. After each task, they completed the thinking content component of the DSSQ, a 16-item questionnaire assessing the frequency of task unrelated thoughts (TUT, Smallwood et al., 2003) that occurred during the previously completed task.

2.3. EEG recordings and analysis

Electroencephalograms (EEGs) were recorded from 32 Ag/AgCl BioSemi active electrodes mounted in an elastic cap. Electrodes were placed according to the standard 10–20 system designed to cover a large median area of the scalp (AFz, F3, F1, Fz, F2, F4, FC3, FC1, FCz, FC2, FC4, C3, C1, Cz, C2, C4, CP3, CP1, CPz, CP2, CP4, P3, P1, Pz, P2, P4, PO3, POz, PO4, O1, Oz, O2). Data were sampled at a rate of 512 Hz (bandpass filter of 0.01-100 Hz, 12 dB/octave). Using Brain Vision Analyzer software, the data were re-referenced off-line to average the two ears, and digitally filtered with a 30 Hz low-pass filter. To monitor ocular

artifacts, vertical and horizontal electrooculographic potentials (EOG) were recorded bipolarly.

EEGs were epoched from -200 before to 800 ms following presentation of the stimulus. The Gratton and Coles algorithm (Gratton et al., 1983) was used to correct eye movement and blink artifacts. Specific intervals for individual channels were rejected in each epoched trial using a semi-automated procedure, with physiological and motor artifacts identified by the following criteria: a voltage step of more than 50.0 μV between sample points, a voltage difference of 200.0 μV within a trial, a maximum of 100 μV and a minimum of -100 μV within a segment, and a maximum voltage difference of less than 0.50 μV within 100 ms intervals. The remaining trials were baseline corrected over a 200 ms interval preceding the onset of the stimulus and were averaged for each condition and participant individually.

Visual inspection of the grand average waveforms evidenced clear P2, N2 and P3 components in both tasks. We limited the analysis of each component to the electrode site where amplitude was the largest across groups and conditions: FCz for the P2 and the N2, and Pz for the P3. Based on visual inspection of the grand average waveforms, peak detection was carried out for each subject and each condition (target and non-target) in the following time windows: 100–250 ms for the P2, 200-400 ms for the N2. Peak amplitude and peak latency of these components were then calculated. Regarding the P3, mean amplitude was measured in specific time windows according to task and age group: in the TFT SART, a time range between 390 and 470 ms in the younger group, and between 410 and 490 ms in the older group; in the Go/No-Go SART, a time range between 410 and 490 ms in the younger group, and between 430 and 510 ms in the older group. For P3 latency, peak detection was carried out for each subject and each condition (target and non-target) in a time range between 400 and 600 ms.

2.4. Statistical analyses

For performance and ERP analysis, the TFT SART and the Go/No-Go SART were divided into three 10-minute periods (270 trials each, 30 of each of the nine digits).

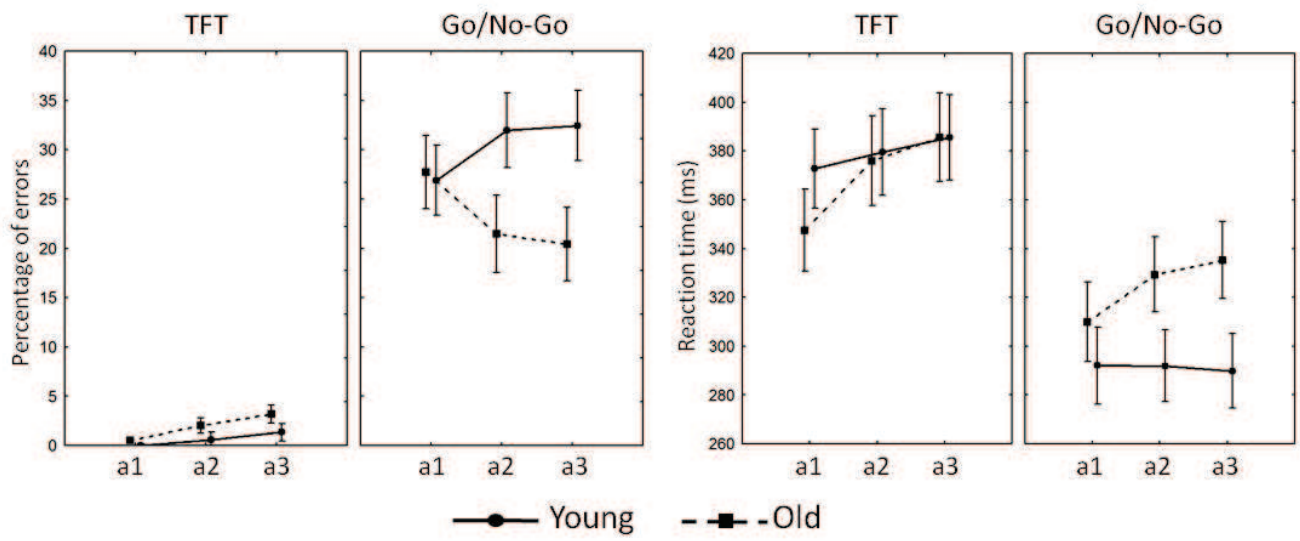


Figure 1. Interaction between age (young/old), task (TFT SART/ Go/No-Go SART) and period (a1/a2/a3) on the percentage of errors (left panel) and on reaction times (right panel).

Vertical bars represent standard deviations.

As typically in such tasks, percentages of errors and mean reaction times served as performance measures: for the TFT SART, percentages of omission errors (i.e. failure to press on the target) and mean reaction times in target trials were taken into consideration; for the Go/No-Go SART, the percentage of commission errors (i.e. false presses on the target) and mean reaction times in non-target trials were taken into consideration.

Performance data were subjected to analysis of variance (ANOVA), which included the between-subject factor age (young/old) and the within-subject factors task (TFT SART/ Go/No-Go SART) and period (a1/a2/a3).

For the ERP analysis, in order to examine the specific processes involved in each task, we analyzed data from each task separately. Accordingly, P2 and P3 amplitudes/latencies in the TFT SART, and P2, N2 and P3 amplitudes/latencies in the Go/No-Go SART, were subjected to ANOVAs that included the factors age (young/old), stimulus type (target/non-target) and period (a1/a2/a3).

For the analysis of subjective data, a t-test was performed on results from the motivation component of the DSSQ. Results from the thinking component of the DSSQ (TUTs) were submitted to ANOVAs that included the between-subject factor age (young/old) and the within-subject factors task (TFT SART/ Go/No-Go SART).

3. Results

3.1. Performance data

The ANOVA performed on the percentage of errors revealed a significant interaction between age, task and period ($F(2, 100)=14.2$, $p < .001$) (Figure 1, left panel). Planned comparisons revealed that in the TFT SART, omission errors increased significantly only in the older group between periods a1 and a3 ($p < .005$) and between a2 and a3 ($p < .03$), whereas in the younger group, omission errors remained stable across periods ($p > 1$). In the Go/No-Go SART, however, commission errors significantly increased in young subjects throughout the task (between a1 and a2, $p < .007$, and between a1 and a3, $p < .009$), whereas in the older group, commission errors actually decreased between a1 and a2, and between a1 and a3 ($p < .001$).

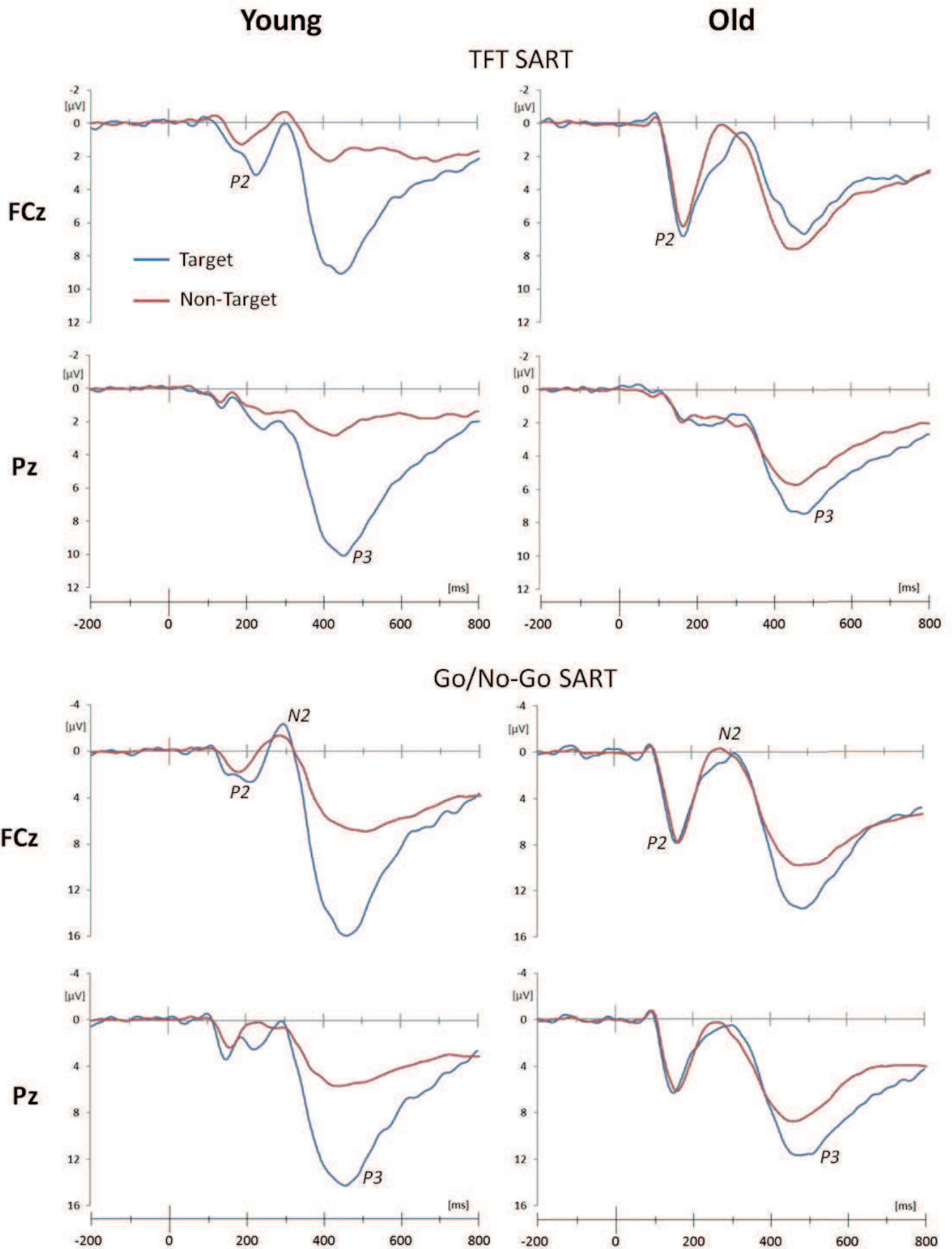


Figure 2. ERP waveforms in the TFT SART (top) and the Go/No-Go SART (bottom), at electrode sites FCz and Pz, according to age (young/old) and stimulus type (target/non-target).

The ANOVA performed on reaction times revealed that the interaction between age, task and period was not significant ($F(2, 100)=.07, p = .94$) (Figure 1, right panel). However, there was a significant interaction between age and period ($F(2, 100)=6.23, p < .003$): in older adults, reaction times increased with time on task (between a1 and a2, and between a1 and a3 $p < .001$), while in younger adults reaction times remained stable with time on task ($p > 1$).

3.2. ERP data

The following text only describes main effects and interactions that are of interest to our objective, and the planned comparisons of interactions involving the factor age.

Figure 2 presents ERP waveforms of the P2 and P3 components in the TFT SART, and the P2, N2 and P3 components in the Go/No-Go SART, at electrodes FCz and Pz, according to age and stimulus type. Figure 3 presents ERP waveforms of the P3 component in the TFT and the Go/No-Go SART at electrode Pz, according to age, period and stimulus type.

3.2.1. TFT SART

P2. The ANOVA performed on P2 amplitude revealed three main effects, of age ($F(1, 50)=13.86, p < .001$), of period ($F(2, 100)=3.66, p < .03$), and of stimulus type ($F(1, 50)=86.57, p < .001$): P2 amplitudes were larger in older adults than in younger adults, they increased between a1 and a3 ($p < .03$), and they were larger on targets than on non-targets. The interaction between age, period and stimulus type was not significant ($F(2, 100)=1.42, p = .25$). No other significant interactions were evidenced.

Regarding P2 latency, the ANOVA did not reveal any significant interaction between age, period and stimulus type ($F(2, 100)=1.37, p = .26$). There was, however, a significant interaction between period and stimulus type ($F(2, 100)=3.35, p < .04$).

P3. The ANOVA performed on P3 amplitude revealed a significant interaction between age and stimulus type ($F(1, 50)=14.17, p < .001$): planned comparisons indicated that in older adults, target P3s were only marginally larger than non-target P3s ($p = .09$),

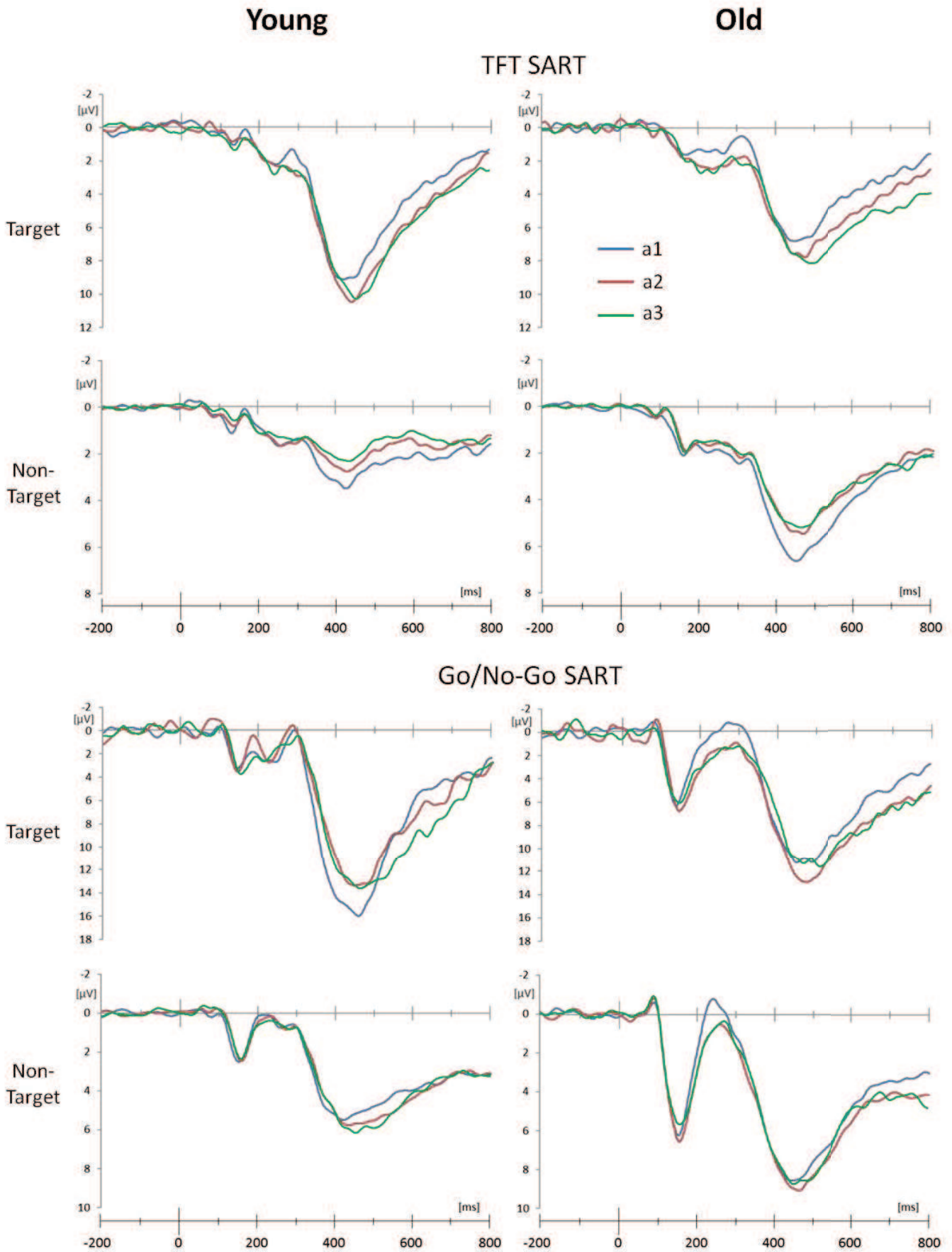


Figure 3. ERP waveforms in the TFT SART (top) and the Go/No-Go SART (bottom), at electrode site Pz, according to age (young/old), period (a1/a2/a3) and stimulus type (target/non-target).

while in the young group target P3s were significantly larger than non-target P3s ($p < .001$). Also, regarding amplitude differences between the two groups, older adults had larger non-target P3s than younger adults ($p < .001$), while both groups exhibited comparable amplitudes with regard to target P3s. The interaction between age, stimulus type and period was not significant ($F(2, 100)=.04, p = .96$). There was, however, a significant interaction between stimulus type and period ($F(2, 100)=16.71, p < .001$).

The ANOVA performed on P3 latency indicated that the interaction between age, period and stimulus type was not significant ($F(2, 100)=.71, p = .50$). However, there was a marginal interaction between age and period ($F(2, 100)=2.35, p = .09$): in older adults, P3 latencies tended to increase between a1 and a3 ($p = .09$), whereas in younger adults P3 latencies significantly decreased between a2 and a3 ($p < .02$). No other significant interactions were evidenced.

3.2.2. Go/No-Go SART

P2. The ANOVA performed on P2 amplitude revealed two main effects, of age ($F(1, 50)=18.33, p < .001$) and of stimulus type ($F(1, 50)=28.13, p < .001$): they were larger in older adults than in younger adults, and they were larger to targets than to non-targets. The interaction between age, period and stimulus type was not significant ($F(2, 100)=.21, p = .82$). No other significant interactions were evidenced.

The ANOVA performed on P2 latency indicated that the interaction between age, period and stimulus type was not significant ($F(2, 100)=1.35, p = .26$). There was a main effect of period ($F(2, 100)=5.54, p < .006$): P2 latencies increased between a1 and a3 ($p < .007$) and between a2 and a3 ($p < .02$). No other significant interactions were evidenced.

N2. The ANOVA performed on N2 amplitude revealed a significant interaction between age and stimulus type ($F(1, 50)=4.28, p < .05$): planned comparisons indicated that in older adults, N2 amplitudes to targets and to non-targets did not differ ($p > 1$), while in younger adults N2 amplitudes were larger to targets than to non-targets ($p < .001$). In addition, target N2s were larger in the younger group than in the older group ($p < .02$), while

non-target N2s did not differ between the two groups ($p > 1$). There was also a significant interaction between age and period ($F(2, 100)=3.34, p < .04$): in older adults, N2 amplitudes decreased between a1 and a2 ($p < .02$), and between a1 and a3 ($p < .003$), while they remained stable throughout the task in the young group. The interaction between age, period and stimulus type was not significant ($F(2, 100)=.96, p = .39$).

The ANOVA performed on N2 latency indicated that the interaction between age, period and stimulus type was not significant ($F(2, 100)=2.28, p = .11$). Two main effects were evidenced, of period ($F(2, 100)=4.41, p < .02$), and of stimulus type ($F(1, 50)=31.51, p < .001$): N2 latencies increased between a1 and a3 ($p < .007$), and N2 latencies were longer to targets than to non-targets.

P3. The ANOVA performed on P3 amplitudes revealed a marginal interaction between age, period and stimulus type ($F(2, 100)=2.67, p = .07$): planned comparisons indicated that P3 amplitudes to targets decreased throughout the task in younger adults (between a1 and a2, $p < .04$, and between a1 and a3, $p = .06$), but not in older adults. Concerning non-target P3, amplitudes remained stable with time on tasks in both groups. A significant interaction between age and stimulus type ($F(1, 50)=21.79, p < .001$) also indicated that in both groups, P3 amplitudes were larger to targets than to non-targets ($p < .001$). Concerning group differences, young subjects tended to have larger target P3s than older subjects ($p = .06$), while older adults had significantly larger non-target P3s than younger adults ($p < .05$).

The ANOVA performed on P3 latency indicated that the interaction between age, period and stimulus type was not significant ($F(2, 100)=1.3, p = .28$). There was, however, a marginal interaction between period and stimulus type ($F(2, 100)=2.47, p = .09$).

3.3. Subjective data

3.3.1. Motivation component of the DSSQ

The t-test revealed a significant difference between the two groups ($t(50)=-4.06, p < .001$): older adults (score: $M = 2.7, SD = 0.35$) were more motivated than younger adults (score: $M = 2.25, SD = 0.42$).

3.3.2. Thinking component of the DSSQ

The ANOVA revealed a main effect of age ($F(1, 50)=10.3, p < .003$): younger adults ($M = 1.09, SD = 0.07$) reported more TUTs than older adults ($M = 0.75, SD = 0.08$). A main effect of task was also found ($F(1, 50)=6.77, p < .02$): subjects reported more TUTs after the Go/No-Go SART ($M = 0.99, SD = 0.06$) than after the TFT SART ($M = 0.86, SD = 0.06$). No interaction between age and task was found.

4. Discussion

The purpose of this study was to examine whether discrepancies regarding the effect of age on sustained attention performance according to the approach used (TFT or Go/No-Go) could be explained by a differential use of automatic and controlled processes as a function of age. To that end, we administered to younger and older adults two tasks that only differed in their response mode: a TFT SART, in which performance mostly relies on the activation of automatic processes, and a Go/No-Go SART, in which performance mostly relies on the activation of controlled processes. Behavioral results showed that older adults, but not younger adults, exhibited a vigilance decrement in the TFT SART, as evidenced by an increase in omission errors over time. On the contrary, only younger adults displayed a vigilance decrement in the Go/No-Go SART, as evidenced by an increase in commission errors over time, whereas older adults actually improved their performance with time on task.

This result showing opposite effects of age on sustained attention performance according to the type of task can be explained by a differential use of automatic and controlled processes in each age group, as evidenced by several of our ERP results. First, a common result in both the TFT and the Go/No-Go SART is the larger P2 component exhibited by older adults relative to their younger counterparts. Previous studies have already evidenced age-related increases in frontal P2 amplitudes (Amenedo & Diaz, 1999; Anderer et al., 1996; Getzmann et al., 2013; Staub et al., in press), a component that has been conceptualized as a marker of the activation of top-down attentional control over the processing of task-relevant stimuli (Luck & Hillyard, 1994). Thus, our results suggest that compared to younger adults, older participants allocated more attentional resources to the

task at hand, irrespective of its nature. Results on both the P3 and the N2 also point toward a greater mobilization of attentional resources in older adults. Indeed, in both the TFT and the Go/No-Go SART, older adults exhibited larger P3 to non-targets than their younger counterparts, and in the Go/No-Go SART they exhibited similar N2 amplitudes to targets and non-targets: thus, in the older group, the intensity of stimulus processing was not dependent on stimulus type. More precisely, concerning the parietal P3, a component typically used as an index of the attentional resources allocated to stimulus processing (Polich, 1996; Wickens et al., 1983), previous studies had already evidenced age-related increases in its amplitude to neutral stimuli (Daffner et al., 2005; Riis et al., 2008). This result was interpreted by the authors as evidence that the increased use of controlled processing resources in older adults was not limited to a specific stimulus type, but rather reflect the way in which they approached the task in general (Riis et al., 2008). Regarding the N2 component, which has been viewed as a marker of conflict monitoring processes (Donkers & van Boxtel, 2004; Nieuwenhuis et al., 2003), results showing comparable N2 amplitudes to targets and non-targets in older adults suggest that a conflict between two response tendencies (execution and suppression) was present in every trial. While this result could be interpreted as evidence of impaired conflict processing, the pattern of behavioral results showing lower error rates in older adults point towards a different explanation: similar-sized N2 to targets and non-targets could rather reflect controlled processing at early stages of stimulus evaluation that is independent of stimulus type, resulting in more efficient response suppression on the actual occurrence of targets (Lucci et al., 2013). Thus, our results on the P3 and the N2 components suggest that in both tasks, older adults adopted a general, event-independent, controlled processing mode, as reflected in the allocation of equal amounts of attentional resources to the processing and evaluation of targets and non-targets.

Finally, the recruitment of automatic or controlled processes in each task also differed between younger and older subjects from a time on task perspective. First, with regard to the TFT SART, ERP results suggest that in younger adults, the automation of the stimulus-response relationship (on targets) effectively occurred over the course of the task. Indeed, P3 latencies to targets decreased with time on task only in younger adults. This result suggest that in the young group, stimulus evaluation time decreased as the task

advanced (Donchin & Coles, 1988), or, in other words, that target processing became more automatic over the course of the task. On the contrary, increasing P3 latencies over time in the older group suggest that the engagement of stimulus evaluation processes became even more controlled as the task advanced (Kok, 2001; Polich, 1987). Concerning the Go/No-Go task, several ERP results are also evidence for sustained activity of controlled processes in older adults and, on the contrary, for decreasing control in younger adults. With regard to the young group, ERP data evidenced decreasing amplitudes of target P3s with time on task. These results suggest that as the task advanced, younger subjects devoted less attentional resources to the processing of targets (requiring inhibition), which may in part explain the increasing rate of commission errors with time on task in this group. In older adults, however, P3 amplitudes to targets remained stable over the course of the task, which suggests that they maintained a steady level of control over target processing with time on task. In addition, decreasing N2 amplitudes over time in older adults suggest that conflict between two response tendencies on the occurrence of a stimulus diminished as the task advanced, which can certainly be explained by their sustained control over task, and which resulted in decreasing rates of inhibition failures over the course of the task. This increased control over time in older subjects was also evidenced by results on response times, which became slower with time on task while error rates decreased. These results suggest that as the task advanced, seniors privileged accuracy over speed, reflecting the implementation of a strategic, effortful, and thus controlled approach to the task (Carriere et al., 2010). It is worth noting that older adults' ability to maintain this effortful control over response throughout the course of the task could be in part explained by the greater motivation they displayed, as evidenced by subjective results. Indeed, their higher level of motivation may have enabled them to mobilize increased attentional effort in order to stay on task and, as a corollary, to inhibit potentially distracting task unrelated thoughts, which older adults reported to experience less frequently than their younger counterparts (Sarter et al., 2006; Sarter & Paolone, 2011).

5. Conclusion

Our results showed that older adults evidenced a vigilance decrement in the TFT SART, but improved their performance over the course of the task in the Go/No-Go SART. On the contrary, younger adults exhibited a vigilance decrement in the Go/No-Go task, but maintained their level of performance over time in the TFT. In accordance with our hypothesis, these results can be explained by a differential use of automatic and controlled processes for task performance in each group: in both tasks, older adults adopted a controlled processing mode, notably characterized by substantial resource allocation irrespective of stimulus type, as evidenced by increased P2s and non-target P3s in both tasks, and by similar sized N2s on targets and non-targets in the Go/No-Go task. Maintaining this controlled strategy over the course of the task had opposite effect according to task type: it may have been too resource consuming and thus detrimental to performance in the TFT SART, whereas it enabled them to improve their performance as the task advanced in the Go/No-Go SART.

References

- Amenedo E, Díaz F. Aging-related changes in processing of non-target and target stimuli during an auditory oddball task. *Biol Psychol* 1998;48(3):235–67.
- Amenedo E, Díaz F. Ageing-related changes in the processing of attended and unattended standard stimuli. *Neuroreport* 1999;10(11):2383–88.
- Anderer P, Semlitsch HV, Saletu B. Multichannel auditory event-related brain potentials: effects of normal aging on the scalp distribution of N1, P2, N2 and P300 latencies and amplitudes. *Electroencephal Clin Neurophysiol* 1996;99:458–72.
- Carriere JS, Cheyne JA, Solman GJ, Smilek D. Age trends for failures of sustained attention. *Psychol Aging* 2010;25(3):569–74.
- Daffner KR, Ryan KK, Williams DM, Budson AE, Rentz DM, Scinto LF, et al. Age-related differences in novelty and target processing among cognitively high performing adults. *Neurobiol Aging* 2005;26(9):1283–95.
- Datta A, Cusack R, Hawkins K, Heutink J, Rorden C, Robertson IH, et al. The P300 as a marker of waning attention and error propensity. *Comput Intell Neurosci* 2007;93968.
- Davies DR, Parasuraman R. *The psychology of vigilance*. London, New York: Academic Press; 1982.
- Donchin E, Coles MGH. Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behav Brain Sci* 1988;11:357–74.
- Donkers FCL, van Boxtel GJM. The N2 in go/no-go task reflects conflict monitoring not response inhibition. *Brain Cognition* 2004;56:165–76.
- Fisk AD, Schneider W. Control and automatic processing during tasks requiring sustained attention: A new approach to vigilance. *Hum Factors* 1981;23:737–50.

- Fisk AD, Rogers WA, Giambra LM. Consistent and varied memory/visual search: Is there an interaction between age and response- set effects? *J Gerontol* 1990;45:P81–P87.
- Ford JM, Roth WT, Isaacks BG, Tinklenberg JR, Yesavage J, Pfefferbaum A. Automatic and effortful processing in aging and dementia: event-related brain potentials. *Neurobiol Aging* 1997;18(2):169–80.
- Ford JM, Roth WT, Isaacks BG, White PM, Hood SH, Pfefferbaum A. Elderly men and women are less responsive to startling noises: N1, P3 and blink evidence. *Biol Psychol* 1995;39(2):57–80.
- Getzmann S, Gajewski PD, Falkenstein M. Does age increase auditory distraction? Electrophysiological correlates of high and low performance in seniors. *Neurobiol Aging* 2013;34(8):1952–62.
- Gratton G, Coles MG, Donchin E. A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroen Clin Neuro* 1983;55:468–84.
- Grier RA, Warm JS, Dember WN, Matthews G, Galinsky TL, Szalma JL., et al. The vigilance decrement reflects limitations in effortful attention, not mindlessness. *Hum Factors* 2003;45(3):349–59.
- Hasher L, Zacks RT. Automatic and effortful processes in memory. *J Exp Psychol* 1979;108:356–88.
- Hoffman JE, Simons RF, Houck MR. Event-Related Potentials During Controlled and Automatic Target Detection. *Psychophysiology* 1983;20(6):625–32.
- Isreal JB, Chesney GL, Wickens CD, Donchin E. P300 and tracking difficulty: Evidence for multiple resources in dual-task performance. *Psychophysiology* 1980;17:259–73.
- Jennings JM, Jacoby LL. Automatic versus intentional uses of memory: aging, attention, and control. *Psychol Aging* 1993;8(2):283–93.

- Kok A. On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology* 2001;38:557–77.
- Lucci G, Berchicci M, Spinelli D, Taddei F, Di Russo F. The effects of aging on conflict detection. *PloS one* 2013;8(2):e56566.
- Luck SJ, Hillyard SA. Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search. *Psychophysiology* 1994;31:291–308.
- Mackworth NH. The breakdown of vigilance during prolonged visual search. *Q J Exp Psychol* 1948;1:6–21.
- Mackworth NH. Some factors affecting vigilance. *Adv Sci* 1957;53:389–93.
- Madden DJ, Whiting WL, Provenzale JM, Huettel SA. Age-related changes in neural activity during visual target detection measured by fMRI. *Cereb Cortex* 2004;14(2):143–55.
- Manly T, Robertson IH, Galloway M, Hawkins K. The absent mind: further investigations of sustained attention to response. *Neuropsychologia* 1999;37(6):661–70.
- Matthews G, Joyner L, Gilliland K, Campbell SE, Falconer S, Huggins J. Validation of a comprehensive stress state questionnaire: Towards a state ‘Big Three’? In: Mervielde I, Deary IJ, De Fruyt F, Ostendorf F, editors. *Personality psychology in Europe* (Vol. 7). Tilburg, the Netherlands: Tilburg University Press; 1999. pp. 335–350.
- Nieuwenhuis S, Yeung N, van den Wildenberg W, Ridderinkhof KR. Electrophysiological correlates of anterior cingulate function in a Go/NoGo task: Effects of response conflict and trial type frequency. *Cogn Affect Behav Neurosci* 2003;3:17–26.
- Norman DA, Shallice T. Attention to action: Willed and automatic control of behaviour. In: Davidson RJ, Schwartz GE, Shapiro D, editors. *Consciousness and self-regulation* (Vol. 4). New York: Plenum; 1986. pp. 1–18.

-
- Parasuraman R. Vigilance, monitoring, and search. In: Boff KR, Kaufman L, Thomas JP, editors. Handbook of perception and human performance: Vol. II. Cognitive processes and performance. New York: Wiley; 1986. pp. 43-1, 43-39.
- Pattyn N, Soetens E. Endogenous and exogenous attention in vigilance tasks. Abstracts of the 46th Annual Meeting of the International Military Testing Association 2004; p.56.
- Polich J. Task difficulty, probability, and inter-stimulus interval as determinants of P300 from auditory stimuli. *Electroen Clin Neurophysiol* 1987;68:311–20.
- Polich J. Meta-analysis of P300 normative aging studies. *Psychophysiology* 1996;33:334–53.
- Raven J, Raven JC, Court JH. Advanced progressive matrices. Oxford: Oxford Psychologists Press; 1998.
- Riis JL, Chong H, Ryan KK, Wolk DA, Rentz DM, Holcomb PJ, et al. Compensatory neural activity distinguishes different patterns of normal cognitive aging. *Neuroimage* 2008;39(1):441–54.
- Robertson IH, Manly T, Andrade J, Baddeley BT, Yiend J. ‘Oops!’: Performance correlates of everyday attentional failures in traumatic brain injured and normal subjects. *Neuropsychologia* 1997;35(6):747–58.
- Romero R, Polich J. P3(00) habituation from auditory and visual stimuli. *Physiol Behav* 1996;59:517–22.
- Sarter M, Gehring WJ, Kozak R. More attention must be paid: the neurobiology of attentional effort. *Brain Res Rev* 2006;51:145–60.
- Sarter M, Paolone G. Deficits in attentional control: cholinergic mechanisms and circuitry-based treatment approaches. *Behav Neurosci* 2011;125(6):825–35.
- Shallice T. From neuropsychology to mental structure. Cambridge University Press; 1988.
- Smallwood J, Obonsawin MC, Heim SD. Task unrelated thought: The role of distributed processing. *Conscious Cogn* 2003;12(2):169–89.

- Staub B, Doignon-Camus N, Bacon E, Bonnefond A. Investigating sustained attention ability in the elderly by using two different approaches: Inhibiting ongoing behavior versus responding on rare occasions. *Acta Psychol* 2014;146:51–7.
- Staub B, Doignon-Camus N, Bacon E, Bonnefond A. The effects of age on aging on sustained attention ability: an ERP study. *Psychol Aging* (in press).
- Staub B, Doignon-Camus N, Després O, Bonnefond A. Sustained attention in the elderly: What do we know and what does it tell us about cognitive aging? *Ageing Res Rev* 2013;12: 459–68.
- Stevenson H, Russell PN, Helton WS. Search asymmetry, sustained attention, and response inhibition. *Brain Cognition* 2011;20:1732–37.
- Stuss DT, Shallice T, Alexander MP, Picton TW. A multidisciplinary approach to anterior attentional functions. *Ann NY Acad Sci* 1995;769:191–209.
- Titov N, Knight RG. Adult age differences in controlled and automatic memory processing. *Psychol Aging* 1997;12(4):565–73.
- Wickens C, Kramer A, Vanasse L, Donchin E. Performance of concurrent tasks: a psychophysiological analysis of the reciprocity of information-processing resources. *Science* 1983;221:1080–82.

Rappel des résultats principaux de l'étude 2 et objectifs de l'étude 3

Notre deuxième étude nous a permis de mettre en évidence le recours à un mode de traitement plus contrôlé chez les sujets âgés comparativement aux sujets jeunes lors de la réalisation des deux tâches. Ce mode de traitement se traduit notamment par une mobilisation attentionnelle plus importante indépendamment du type de stimulus à traiter (cible ou non-cible). Le maintien au fil de la tâche de cette stratégie a des répercussions différentes sur les performances d'attention soutenue selon la nature de la tâche (tâche de détection *versus* tâche d'inhibition). Dans la tâche de détection (SART TFT), la forte mobilisation des mécanismes de contrôle cognitif a été inefficace : elle pourrait avoir été trop consommatrice en ressources attentionnelles et donc se répercuter négativement sur les capacités d'attention soutenue. A l'inverse, dans la tâche d'inhibition (SART Go/No-Go), cette stratégie contrôlée aurait eu des effets bénéfiques permettant à ces seniors de maintenir un bon niveau de performances au fil de la tâche.

Dans la continuité de ces deux premières études, notre travail expérimental s'est recentré autour de l'étude des effets du vieillissement normal sur les mécanismes cognitifs et neuronaux de contrôle attentionnel sous-tendant les capacités d'attention soutenue. Ainsi, dans l'étude 3, les capacités d'attention soutenue ont été évaluées à l'aide d'une tâche d'inhibition de type Go/No-Go. L'objectif ici était d'étudier de façon plus spécifique deux des mécanismes de contrôle cognitif essentiels au bon maintien des performances d'attention soutenue : l'inhibition et l'allocation des ressources attentionnelles. A cette fin, nous nous sommes appuyés sur des mesures de potentiels évoqués, pour étudier le décours temporel de ces mécanismes lors de la réalisation d'une longue tâche d'inhibition de type Go/No-Go.

Etude 3

Staub, B., Doignon-Camus, N., Bacon, E., & Bonnefond, A. (in press). The effects of aging on sustained attention ability: an ERP study. *Psychology and aging*.

The effects of aging on sustained attention ability: an ERP study

Béregère Staub, Nadège Doignon-Camus, Élisabeth Bacon & Anne Bonnefond

INSERM U1114, Pôle de Psychiatrie, Hôpital Civil de Strasbourg, France

Corresponding author: Béregère Staub

Unité INSERM 1114, Pôle de Psychiatrie, Hôpital Civil de Strasbourg

1 place de l'Hôpital, 67091 Strasbourg Cedex, France

E-mail : berengere.staub@etu.unistra.fr

Tel: +33 3 88 11 64 45, Fax: +33 3 88 11 64 46

Abstract

The aim of this study was to investigate the effects of aging on inhibitory processes and attentional resources in a long-lasting Go/No-Go sustained attention task using the ERP technique. In line with recent studies, our results showed that older adults were able to maintain sustained attention performance throughout the duration of the task, whereas younger subjects exhibited a vigilance decrement. Regarding ERP results, older adults had larger P2 and Go-P3 amplitudes, components related to resource allocation, suggesting that the older subjects invested more resources in task performance. In addition, the No-Go P3 component, related to inhibitory processes, was more frontally distributed in older than in younger participants. This age-related scalp frontal over-recruitment may have played a compensatory role, enabling older subjects to perform better than younger subjects throughout the duration of the task.

Keywords: Vigilance, age, Go/No-Go task, time-on-task, P2, P3, inhibition, attentional resources

Introduction

The ability to sustain attention on a given stimulation source or task is a fundamental component of the cognitive capacities of humans, without which many other perceptual and cognitive functions would be compromised (Parasuraman, Warm, & See, 1998). Tasks classically used to assess sustained attention ability require an individual to maintain attention for the occurrence of infrequent, unpredictable events over long periods of time (Davies & Parasuraman, 1982; Mackworth, 1957; Parasuraman, 1986). Sustained attention ability is mainly evaluated by the vigilance decrement, which is typified by either a decrease in the number of correct detections over time and/or an increase in reaction time to signals over the watch-keeping period (Parasuraman et al., 1998). Most of the decrement typically appears within the first 15 minutes of watch (Teichner, 1974). More recently, a new way to study sustained attention ability emerged. In contrast to “traditionally formatted tasks” (TFTs) (Stevenson et al., 2011), which required the participant to respond to infrequent targets, the tasks used in this approach require the participant to inhibit ongoing behavior on rare occasions. Indeed, in these Go/No-Go paradigms, among which the sustained attention of response task (SART; Robertson et al., 1997) is the one of the most widely used tasks, subjects have to respond to frequent non-targets (Go stimuli) and to withhold response to rare targets (No-Go stimuli). The main indicators of faulty sustained attention are short attention lapses, which behaviorally translate into failures to inhibit response on No-Go trials and are thus more commonly referred to as action slips or errors of commission. In the SART, lapses occur very rapidly, in less than four minutes of watch keeping. Consequently, the errors themselves, not the relative change in performance overtime, are interpreted as the indicator of failed sustained attention.

Up to now, very few studies using these Go/No-Go paradigms have been conducted to assess the effects of normal aging on sustained attention ability. The most recent studies showed preservation of this ability in older adults (Brache, Scialfa, & Hudson, 2010; Carriere, Cheyne, Solman, & Smilek, 2010; Jackson & Balota, 2012; McVay, Meier, Touron, & Kane, 2013; Staub, Doignon-Camus, Bacon, & Bonnefond, 2014; but see McAvinue et al., 2012). Indeed, these exclusively behavioral studies reported that older adults are generally more accurate (lower overall rate of commission errors) but slower (increased overall reaction

time) than young individuals. For example, in the study conducted by Brache et al. (2010), one group of younger and another group of older adults performed a Go/No-Go sustained attention task (total length 50 min, with short breaks every 10 min) presented as a simulation of industrial inspection. They viewed “good” parts, to which they had to respond (“Go” stimuli), and “bad” parts, to which they had to withhold their response (“No-Go” stimuli). Compared to the younger group, older adults produced lower error rates (errors of commission), which also remained stable with time on task, whereas errors of commission increased in younger subjects. Using the same approach, Carriere et al. (2010), Jackson and Balota (2012) and McVay et al. (2013) obtained comparable results with the classic SART (around 20 min): overall, older adults were more accurate but slower in their responses than younger adults. Several hypotheses have been put forward to explain these results, which are paradoxical in light of the well-documented age-related declines in cognitive performance. First of all, as evidenced by their reaction time, older adults may have used a more conservative response strategy than younger adults in order to avoid making mistakes. Indeed, it has been shown in various paradigms that older adults typically exhibit normal or lower error rates but longer response times than younger individuals, suggesting age differences in speed accuracy trade-offs (Endrass, Kathmann, & Schreiber, 2012; Hoffmann & Falkenstein, 2011; Falkenstein, Hoormann, & Hohnsbein, 2001; Mathalon et al., 2003). Moreover, on a more subjective level, elderly people have been shown to be less likely to report mind-wandering than younger adults. Their relatively low levels of reported mind-wandering or task-unrelated thoughts that have been evidenced in several studies (Cheyne, Carriere, & Smilek, 2006; Giambra, 1989; Jackson & Balota, 2012; McVay et al., 2013, Smallwood et al., 2004) probably make them less subject to momentary task disengagements, which are known to lead to the commission of errors (Robertson, Manly, Andrade, Baddeley, & Yiend, 1997). Finally, it has also been shown that older adults are more motivated than younger subjects even in tasks that are particularly conducive of boredom (Thackray & Touchstone, 1981). This higher level of intrinsic motivation is also reflected in older adults’ preference for taking up challenges, which is known to positively affect cognitive performance (Forstmeier & Maercker, 2008; Hess, Emery, & Neupert, 2012; Ryan, La Guardia, Solky-Butzel, Chirkov, & Kim, 2005; Vallerand, O’Connor, & Hamel, 1995).

However, until now, no electrophysiological study has been conducted to assess the effects of aging on inhibitory processes and attentional resources involved in Go/No-Go sustained attention tasks in order to account for older adults' good sustained attention performance. Still, the effects of normal aging on these cognitive mechanisms are well described in event-related potential (ERP) studies, which have mostly examined the N2 and the P3, two ERP components that have been reported to be consistently larger for No-Go than Go stimuli. The No-Go N2 is assumed to reflect response inhibition or a more general conflict monitoring system (Donkers & van Boxtel, 2004; Falkenstein, Hoormann, & Hohnsbein, 2002; Jodo & Kayama, 1992; Nieuwenhuis, Yeung, van den Wildenberg, & Ridderinkhof, 2003), while the No-Go P3 has been interpreted as indicating the effectiveness of the inhibition (Falkenstein, Koshlykova, Kiroj, Hoormann, & Hohnsbein, 1995; Pfefferbaum, Ford, Weller, & Kopell, 1985; Roberts, Rau, Lutzenberger, & Birbaumer, 1994). Several authors highlighted not only slowing down but also reduced efficiency of inhibition with age. Increased latencies of the No-Go N2 and No-Go P3 components have repeatedly been observed in older adults (Czigler, Csibra, & Ambro, 1996; Falkenstein et al., 2002; Hämmerer, Li, Muller, & Lindenberger, 2010; Pfefferbaum & Ford, 1988; Tachibana, Aragane, & Sugita, 1996) as well as reduced amplitudes of these components (Falkenstein et al., 2002; Jodo & Kayama, 1992; Kok, 1986; Picton, Stuss, Champagne, & Nelson, 1984; Tachibana et al., 1996). However, some inverse effects on the No-Go P3 amplitude have also been described (Vallesi, 2011; Vallesi, Stuss, McIntosh, & Picton 2009; Vallesi & Stuss, 2010), this increase being interpreted as a greater need for the compensatory top-down inhibition of a partial response with normal aging. With regard to attentional resources, reduced resource allocation in older participants, as evidenced by a reduced Go-P3 amplitude – a component related to stimulus categorization or response decision – is a typical finding (Anderer, Semlitsch, & Saletu 1996; Falkenstein et al., 2002; Polich & Kok, 1995; Picton et al., 1984; Polich, 1996; Polich, 2007). However, and interestingly, an age-related deficit in the capacity to withdraw attentional resources from stimuli, notably irrelevant ones, has also been evidenced (Garcia-Larrea, Lukaszewicz, & Mauguiere, 1992; Vallesi et al., 2009). Actually, the earlier posterior P2 component, believed to reflect bottom-up attentional capture, was shown to be more pronounced in older than in younger adults. Age differences

have also been observed in regard to scalp topographies of the N2 and P3 components. In older adults, the No-Go N2 has been found to be reduced in frontal regions but increased in parietal regions (Lucci, Berchicci, Spinelli, Taddei, & Di Russo, 2013; Washer, Falkenstein, & Wild-Wall, 2011; Willemsen, Falkenstein, Schwarz, Müller, & Beste, 2011). This effect has been interpreted as less efficient frontal involvement during action suppression which necessitates the recruitment of additional parietal circuits. As for the P3, a more frontal scalp distribution of both the Go and the No-Go P3 in older relative to younger adults has been repeatedly observed (Fallgatter, Mueller, & Strik, 1999; Friedman, Kazmerski, & Fabiani, 1997; Lucci et al., 2013). This effect has been interpreted as recruitment of additional frontal areas to compensate for processing deficiencies in posterior areas, or as strategic increased reliance on higher order control regions to support task performance (Lucci et al., 2013; O'Connell et al., 2012; Reuter-Lorentz & Park, 2010).

Taken as a whole, if these studies accurately describe the effects of aging on ERP components reflecting inhibition and attentional resources, none evaluated them in a situation of sustained attention, using a time on task perspective. In order to understand the preservation of sustained attention ability in normal aging, this study thus had three aims: the first aim was to determine if the recruitment of cognitive processes related to inhibition and to attentional resources in a situation of sustained attention differed according to age, by examining the possibility that these processes are more efficient in older adults than in younger adults. In a time on task perspective, a second aim was to determine if the effect of the duration of the task on processes related to inhibition and to attentional resources was different between young and older adults. We hypothesized better preservation of these processes over time in older than in younger subjects. Finally, the third aim was to determine if specificities existed in seniors relative to juniors in terms of activation of brain regions underlying processes related to inhibition and to attentional resources. We expected brain regions underlying these processes to be more frontally-distributed in older relative to young adults.

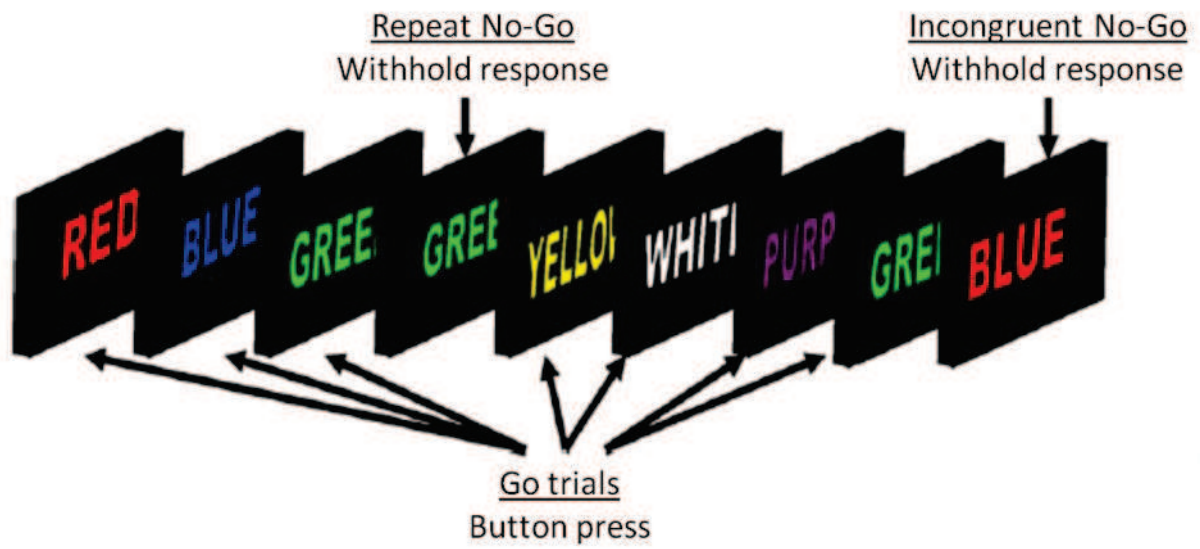


Figure 1. Experimental design (inspired by the error awareness task, Hester et al., 2005).

Methods

Subjects

Twenty-five younger and 25 older adults participated in this experiment. Three younger participants were excluded because they made an insufficient number of correct withholds to generate reliable ERP averages, leaving a final sample of 22 younger (15 females; mean age: 23.2 years; range: 19–32) and 25 older participants (12 females; mean age: 64.8 years; range: 62–74). All the subjects declared that they were free of neurological and psychiatric diseases and had normal or corrected-to-normal vision. All subjects gave their written informed consent, and the study protocol was approved by the local Ethics Committee. Each subject participated in one experimental session, which lasted approximately 120 min. Younger and older adults did not differ in their years of education (completed years of school and university education), $t(45)=-.96$, $p = .34$ (younger adults: 14.3 years ± 1.7 ; older adults: 13.7 years ± 2.2).

Task design and procedure

All subjects completed a motor Go/No-Go response inhibition task (Figure 1). The task involved a serial stream of single color words with manipulated congruency between the word and its font color. Participants were trained to respond to each of the words with a single “Go trial” button press when the word and the font were congruent, and to withhold this response when either of two different circumstances arose (“No-Go trials”). The first was if the same word was presented in two consecutive trials (“Repeat No-Go”), and the second was if the word and the font of the word did not match (“Incongruent No-Go”). Participants were instructed to time their button presses to the offset (i.e. end) of each stimulus. The task lasted 72 minutes. It was divided into nine blocks, each block consisting of 222 trials (198 Go trials and 24 No-Go trials, corresponding to a Go:No-Go ratio of 10:1). All words were presented for 600 ms followed by an inter-stimulus interval of 1500 ms and appeared 0.25° above a white fixation cross on a grey background at a distance of 100 cm. Participants were instructed to focus on the fixation cross during the task in order to minimize eye movements.

Participants completed a series of questionnaires before they started and after they finished the task. Before the task, participants completed the motivation component of the Dundee Stress State Questionnaire (DSSQ, Matthews et al., 1999), a 15-item questionnaire that assesses the participant's motivation to perform the task at hand. After the task, the subjects completed the thinking content component of the DSSQ, a 16-item questionnaire assessing the frequency of task unrelated thoughts (TUT, Smallwood et al., 2003) that occurred during the previously completed task. They also completed the NASA-Task Load Index (NASA-TLX, Hart & Staveland, 1988), which measures the perceived mental workload associated with the task by means of six rating scales (mental demand, physical demand, temporal demand, performance, effort, and frustration).

EEG recordings and analysis

Electroencephalograms (EEGs) were recorded from 32 Ag/AgCl BioSemi active electrodes mounted in an elastic cap. Electrodes were placed according to the standard 10–20 system designed to cover a large median area of the scalp (AFz, F3, F1, Fz, F2, F4, FC3, FC1, FCz, FC2, FC4, C3, C1, Cz, C2, C4, CP3, CP1, CPz, CP2, CP4, P3, P1, Pz, P2, P4, PO3, POz, PO4, O1, Oz, O2). Data were sampled at a rate of 512 Hz (bandpass filter of 0.01-100 Hz, 12 dB/octave). Using Brain Vision Analyzer software, the data were re-referenced off-line to average the two ears, and digitally filtered with a 30 Hz low-pass filter. To monitor ocular artifacts, vertical and horizontal electrooculographic potentials (EOG) were recorded bipolarly. EEGs were epoched from -200 before to 1000 ms following presentation of the stimulus. The Gratton and Coles algorithm (Gratton, Coles, & Donchin 1983) was used to correct eye movement and blink artifacts. Specific intervals for individual channels were rejected in each epoched trial using a semi-automated procedure, with physiological and motor artifacts identified by the following criteria: a voltage step of more than 50.0 μV between sample points, a voltage difference of 200.0 μV within a trial, a maximum of 100 μV and a minimum of -100 μV within a segment, and a maximum voltage difference of less than 0.50 μV within 100 ms intervals. The remaining trials were baseline corrected over a 200 ms interval preceding the onset of the stimulus and were averaged for each condition and participant individually.

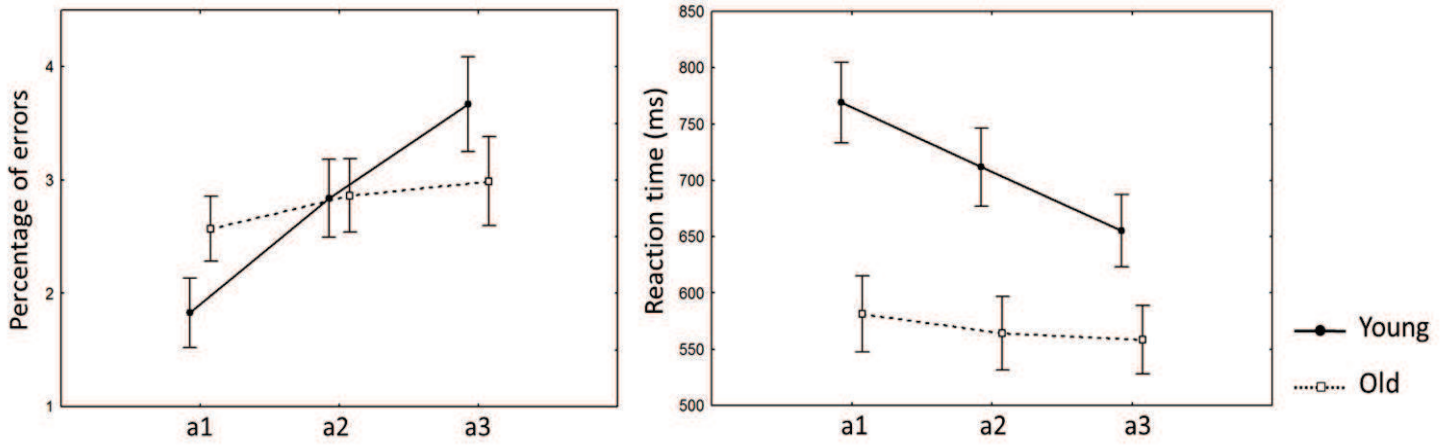


Figure 2. Interaction between age (young/old) and period (a1/a2/a3) on the percentage of errors (left panel) and on reaction times (right panel).

Vertical bars represent standard deviations.

Since the N2, P2 and P3 components were maximal at the medial frontal, central and parietal sites for all groups, we limited the analyses to the Fz, FCz, Cz, CPz and Pz electrode sites. Based on visual inspection of the grand average waveforms, peak detection was carried out for each subject and each condition (Go and No-Go) in the following time windows: 190-350 ms for the N2, and 100–250 ms for the P2. Mean value around peak (i.e. 15 ms before and after the peak) and peak latency of these two components were then calculated. Regarding the P3, mean amplitude was measured in the time range between 500 and 700 ms.

Statistical analyses

For ERP and performance analysis, the task was divided into three periods (a1/a2/a3), with each period corresponding to three task blocks, and, in terms of duration, to 24 min. Since the division of our task into three periods substantially decreased the number of No-Go trials in each period, the two types of No-Go conditions (Repeat and Incongruent) were collapsed into a single condition in order to guarantee a good signal to noise ratio for the ERP analysis. The decision to collapse the two conditions was supported by results of statistical analyses performed on ERPs which did not reveal any interacting effect between age and type of No-Go condition on any of the components of interest.

For performance analysis, percentages of commission errors and reaction times were recorded. They were subjected to analysis of variance (ANOVA), which included the between-subject factor age (young/old) and the within-subject factor period (a1/a2/a3).

For the ERP analysis, amplitudes of the N2, P2 and P3 components were subjected to an ANOVA that included the between-subject factor age (young/old), and the within-subject factors period (a1/a2/a3), stimulus type (Go/No-Go) and electrode-site (Fz/FCz/Cz/CPz/Pz). Latencies of the N2 and P2 components were subjected to an ANOVA that included the between-subject factor age (young/old), and the within-subject factors period (a1/a2/a3) and stimulus type (Go/No-Go). Two additional statistical analyses were performed on ERP data. First, a split-half analysis was performed: in each age group, subjects were split among good and poor performers, based on the median of global error rates; P3 amplitudes were then subjected to an ANOVA that included, in addition to the factors age, period and

	N2		P2		P3
	Amplitude	Latency	Amplitude	Latency	Amplitude
Age <i>F(1,45)</i>	F = 3.585 p = .056	F = 1.35 ns	F = 14.19 p < .001	F = 9.12 p < .005	F = 2.87 p = .09
Period <i>F(2,90)</i>	F = 1.18 ns	F < 1 ns	F = 13.4 p < .001	F=1.64 ns	F = 2.89 p= .06
Stimulus type <i>F(1,45)</i>	F < 1 ns	F = 12.59 p < .001	F = 19.22 p < .001	F = 6.11 p < .02	F = 101.56 p < .001
Electrode site <i>F(4,180)</i>	F = 24.43 p < .001		F = 1.75 ns		F = 12.24 p < .001
Age x period <i>F(2,90)</i>	F =1.23 ns	F = 3.34 p < .04	F < 1 ns	F < 1 ns	F = 1.4 ns
Age x stimulus type <i>F(1,45)</i>	F < 1 ns	F < 1 ns	F = 2.54 ns	F < 1 ns	F = 2.31 ns
Age x electrode site <i>F(4,180)</i>	F = 3.19 p = .015		F = 5.33 p < .001		F = 3.33 p < .02
Period x stimulus type <i>F(2,90)</i>	F < 1 ns	F = 1.82 ns	F = 1.56 ns	F < 1 ns	F = 1.55 ns
Period x electrode site <i>F(8,360)</i>	F = 2.34 p = .018		F < 1 ns		F = 1.57 ns
Stimulus type x electrode site <i>F(4,180)</i>	F = 21.75 p < .001		F = 5.29 p < .001		F = 2.84 p < .03
Age x period x stimulus type <i>F(2,90)</i>	F < 1 ns	F = 3.66 p < .03	F < 1 ns	F = 1.5 ns	F < 1 ns
Age x period x electrode site <i>F(8,360)</i>	F = 1.37 ns		F = 1.9 p = .059		F = 1.67 ns
Age x stimulus type x electrode site <i>F(4,180)</i>	F < 1 ns		F < 1 ns		F = 5.15 p < .001
Period x stimulus type x electrode site <i>F(8,360)</i>	F < 1 ns		F < 1 ns		F = 1.22 ns
Age x period x stimulus type x electrode site <i>F(8,360)</i>	F < 1 ns		F < 1 ns		F < 1 ns

Table 1. Results of analyses of variance with repeated measures on indicated experimental variables: effects of age, period, stimulus type, electrode site, and their interactions.

electrode site, the additional within-subject factor performance level (good/poor). Secondly, an analysis of covariance (ANCOVA) was performed on P2 amplitudes and Go-P3 amplitudes with age as a between-subject factor and with reaction time as a covariant.

For the analysis of subjective data, t-tests were performed on the results of the DSSQ (motivation and thinking components) and on the NASA-TLX.

Results

Performance data

Errors. The ANOVA performed on the percentage of commission errors revealed a significant interaction between age and period ($F(2,90)=8.66$, $p < .001$): in the young group, commission errors increased significantly over the course of the task (between a1 and a2, $p < .001$, and between a2 and a3, $p < .001$), whereas in the group of older participants, commission errors remained stable with time on task (Figure 2, left panel).

Reaction times. The ANOVA performed on reaction times revealed a significant effect of age ($F(1,45)=9.94$, $p < .003$): older adults (568.16 ms \pm 31.2) had shorter reaction times than younger adults (712.1 ms \pm 33.3). A significant interaction between age and period was also observed ($F(2,90)=10.86$, $p < .001$): reaction times decreased in the young group over the course of the task (between a1 and a2, $p < .001$, and between a2 and a3, $p < .001$), whereas in older participants, reaction times remained stable with time on task (Figure 2, right panel).

ERP data

The following text only describes significant main effects and interactions that directly address each of our three objectives. All the other results can be found in Table 1. Figure 3 presents ERP waveforms of the N2, P2 and P3 components according to age, stimulus type and electrode site. Scalp topographies for each component as a function of age and stimulus type are presented in figure 4.

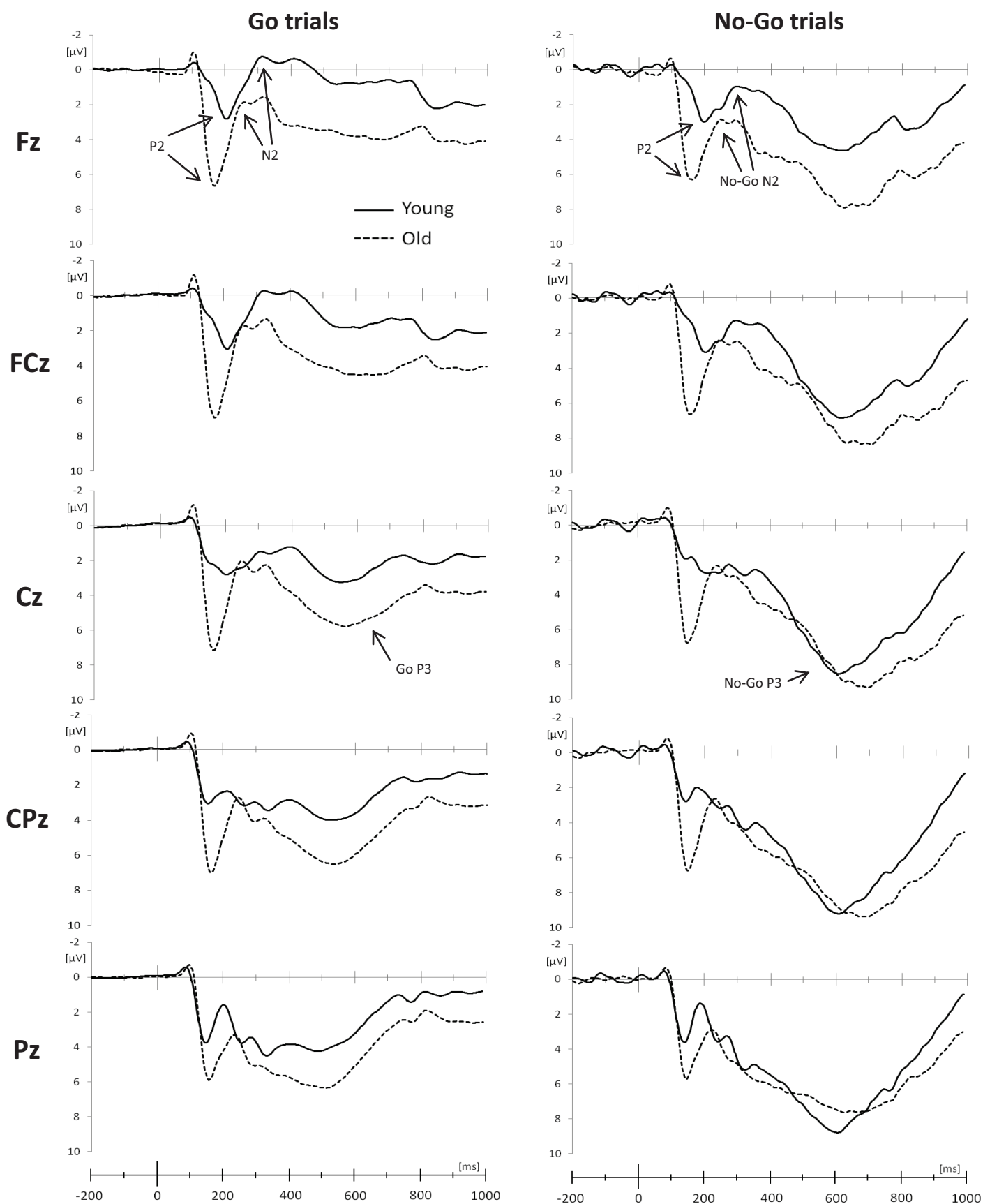


Figure 3. ERP waveforms as a function of age (young/old), stimulus type (Go/No-Go) and electrode site (Fz/FCz/Cz/CPz/Pz).

N2. The ANOVA performed on N2 amplitudes revealed a marginal effect of age ($F(1,45)=3.85$, $p = .056$): younger subjects tended to have larger N2 amplitudes than older subjects. No effect of stimulus type or interaction between age and stimulus type were observed ($F < 1$). A significant interaction between age and period was found on N2 latency ($F(2,90)=3.34$, $p < .04$): planned comparisons indicated that older adults tended to have shorter N2 latency than younger adults in period a3 ($p = .07$). There was a significant interaction between age and electrode site on N2 amplitude ($F(4,180)=3.19$, $p < .02$): younger adults had larger N2 amplitudes than older subjects over Fz and Pz ($p < .04$), while N2 amplitudes were similar between the two groups over FCz, Cz and CPz ($p > 1$).

P2. Regarding the P2 component, a significant effect of age on both P2 amplitude ($F(1,45)=14.19$, $p < .001$) and P2 latency ($F(1,45)=9.12$, $p < .005$) was observed: older adults had larger P2 amplitudes and shorter P2 latencies than younger adults. There was also a significant interaction between age and electrode site on P2 amplitude ($F(4,180)=5.33$, $p < .001$): planned comparisons indicated that in older adults, P2 amplitude was smaller over Pz compared to the other electrode sites ($p < .05$), whereas in younger adults P2 amplitude did not differ between electrode sites ($p > .10$). A marginal interaction between age, period and electrode site ($F(8,360)=1.9$, $p = .059$) revealed that the significant amplitude difference between Pz and Fz in period a1 ($p < .05$) was no longer present in periods a2 and a3 ($p > .10$).

P3. The ANOVA performed on P3 amplitudes revealed a marginal effect of age ($F(1, 45)=2.87$, $p = .09$): older adults tended to have larger P3 amplitudes than younger adults. We did not observe any interaction between age and period on P3 amplitude. However, as suggested by the visual representation of the P3 component in figure 5, planned comparisons indicated that in older adults, the amplitude of the No-Go P3 over Cz increased between period a1 and period a2 ($p < .008$). This effect was also present over FCz, CPz and Pz ($p < .02$). A significant interaction between age and electrode site was obtained ($F(4, 180)=3.33$, $p < .02$): planned comparisons indicated that older adults had larger P3 amplitudes than younger over adults over Fz ($p < .02$), but not over the other electrode sites. A significant interaction between age, stimulus type and electrode site ($F(4, 180)=5.15$,

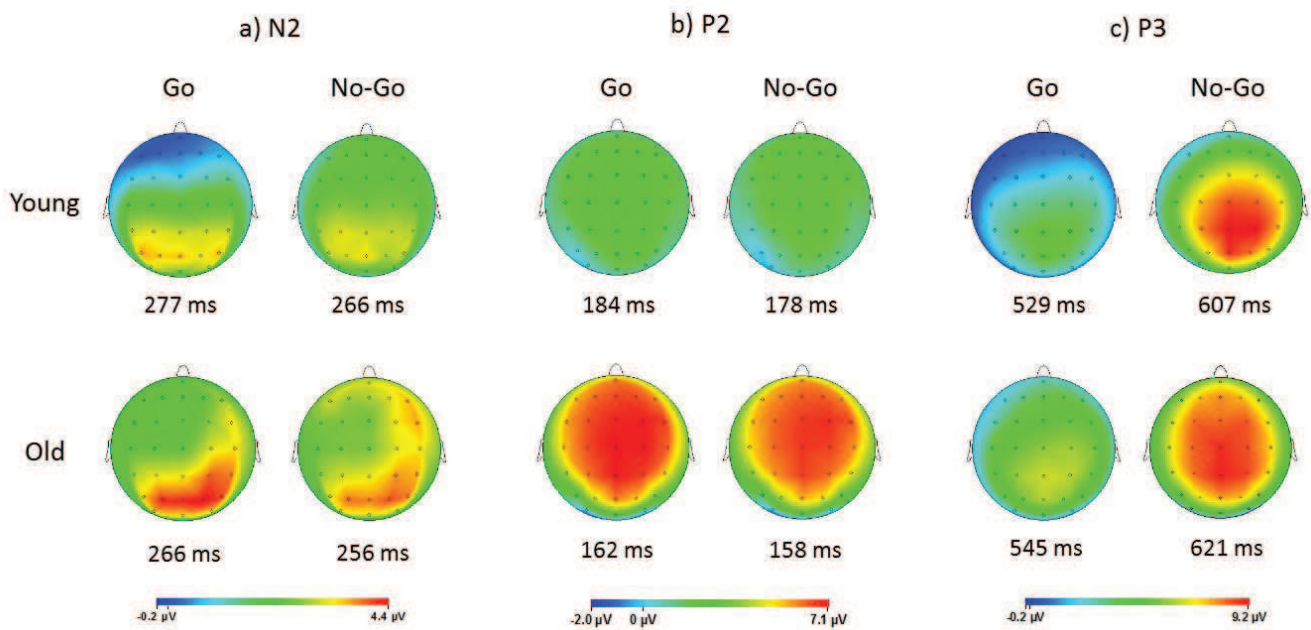


Figure 4. The scalp topographies as a function of age (young/old) and stimulus type (Go/No-Go). The images represent activity on the scalp at the time corresponding to the maximal amplitude of each component for each group.

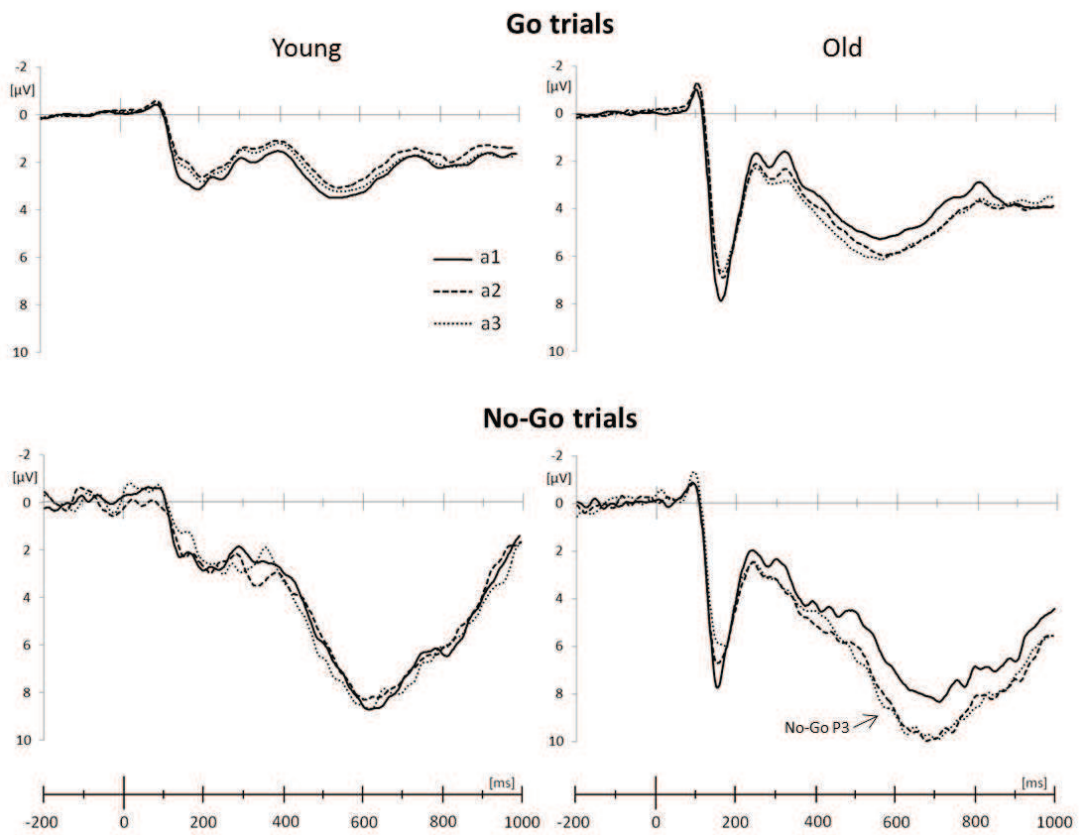


Figure 5. ERP waveforms as a function of age (young/old), period (a1/a2/a3), and stimulus type (Go/No-Go) over Cz.

$p < .001$) specified that this age difference in P3 amplitude solely over Fz concerned No-Go trials, while on Go trials, larger P3 amplitudes in older subjects relative to younger subjects were present over the five electrodes sites ($p < .02$). Also, in older adults, amplitudes of both the No-Go P3 and Go-P3 did not differ between frontal (Fz, FCz) and parietal (CPz, Pz) sites ($p > .10$), while the same comparisons carried out in younger subjects indicated significantly larger No-Go P3 amplitudes ($p < .001$) and marginally larger Go-P3 amplitudes ($p = .07$) over parietal sites than over frontal sites.

Additional statistical analyses. Results of the split half analysis, in which participants were divided among good (below 2.63% of errors in the young group, below 2.7% in the old group) and poor performers (strictly above 2.63% in the young group, strictly above 2.7% in the old group), showed that the interaction between age, stimulus type, electrode site and performance level on P3 amplitudes was not significant ($F < 1$). However, planned comparisons indicated that the good older subjects had significantly larger No-Go P3 amplitude than the good younger subjects over Fz ($p < .03$), while this effect was not found in poor older subjects relative to poor younger subjects.

Concerning the ANCOVA performed on P2 and Go-P3 amplitudes with reaction times as a covariant, results revealed that the effect of age was significant on both P2 amplitudes ($F(1, 44)=7.56$, $p < .009$) and Go-P3 amplitudes ($F(1, 44)=4.83$, $p < .04$): amplitudes of these components were larger in older adults than in younger adults.

Subjective data

The t test performed on the motivation component of the DSSQ revealed a significant difference between the two groups ($t(45)=-2.11$, $p < .05$): older adults (2.46 ± 0.42) were more motivated than younger adults (2.18 ± 0.5).

The t test performed on the thinking component of the DSSQ revealed a significant effect of age ($t(45)=3.49$, $p = < .002$): younger adults (1.23 ± 0.37) reported more TUTs than older individuals (0.8 ± 0.46).

No significant effects were found on the NASA-TLX.

Discussion

The present study investigated age differences in sustained attention ability using behavioral, electrophysiological, and subjective measures in a long lasting Go/No-Go sustained attention task. Based on recent results showing preserved sustained attention performance with age, we expected our older participants to succeed in maintaining their attention over time and younger subjects to exhibit a vigilance decrement. In addition, we expected processes related to inhibition and attentional resources to be more efficient, to be better preserved over time, and to rely on brain areas more frontally-distributed in seniors than in juniors.

Regarding behavioral data, our results showed that older adults were able to maintain sustained attention performance throughout the duration of the Go/No-Go task, whereas younger subjects exhibited a vigilance decrement. These results are in line with those of recent studies using shorter Go/No-Go sustained attention tasks showing that older adults were generally more accurate than their younger counterparts both overall and with time on task (Brache et al., 2010; Carriere et al., 2010; Jackson & Balota, 2012; McVay et al., 2013; Staub et al., 2014; but see McAvinue et al., 2012). Surprisingly, even though the instructions emphasized accuracy over speed, older participants responded faster than younger subjects, and maintained their speed throughout the watch keeping period whereas young subjects became faster with time on task. While the latter observation is in line with the typical description of young adults being less cautious than their elders, even when instructions emphasize accuracy, we did not find the classical age-related slowing down (Brébion, 2001). This result can probably be explained by the fact that older adults did not comply with the instructions to time their button presses to stimulus offset, which may reflect particular sensitivity to any perceived loss of cognitive abilities in this group (Tompsonowski & Tinsley, 1996): they may have been more concerned than young subjects about the quality of their performance, and thus invested more effort in the task in order to perform well both in terms of accuracy and speed. As indicated by subjective reports by our participants, the older adults were indeed more motivated than younger participants. This is in line with previous reports showing that the greater motivation and interest displayed by

older subjects positively affect cognitive performance (Forstmeier & Maercker, 2008; Hess et al., 2012; Thackray & Touchstone, 1981; Vallerand et al., 1995). It is also worth noting that even though the pattern of age differences in reaction times is quite unusual, the additional statistical analyses we performed (ANCOVAs) allowed us to ensure that the age differences we observed in ERPs could not be explained by these reaction times.

Regarding ERP results and our first aim to examine age differences in the general recruitment of processes related to inhibition in a situation of sustained attention, we found that N2 amplitude was marginally lower in older adults. However, no difference in N2 amplitude between Go and No-Go trials was found in either group. Thus, in the present case, the N2 is more likely to reflect a general conflict monitoring system (Donkers & van Boxtel, 2004; Nieuwenhuis et al., 2003) rather than inhibitory processing, which is more commonly assumed to be reflected by the N2 when the amplitude of this component is larger in No-Go than in Go trials (Falkenstein, Hoormann, & Hohnsbein, 1999; Jodo & Kayama, 1992). The equal-sized N2 in Go and No-Go trials in our study may thus reflect the detection of a conflict between two response tendencies (execution and suppression) in every trial. In this line of thought, the marginally lower N2 amplitude in older adults could be interpreted as an impairment of conflict monitoring processes in this population. Age-related deficiencies in conflict processing are a typical finding (West & Alain, 2000): the performance of older adults typically decreases under conditions of high response conflict, as evidenced by reduced accuracy and longer reaction times. However, in the present study, decreased conflict between two response representations (i.e. executing or suppressing a single response) was actually associated with better performance both in terms of accuracy and speed in seniors. Consequently, the effect of age on conflict processing may rather reflect increased top-down controlled processing at early stages of stimulus evaluation in older adults (Lucci et al., 2013), resulting in more efficient response suppression at later stages, as evidenced by the overall lower rate of errors in older than in younger participants. Interestingly, older adults also tended to have shorter N2 latencies than younger participants. It has been suggested that in No-Go trials, N2 onset may be the most valid index of successful motor inhibition (Roche, Garavan, Foxe, & O'Mara, 2005), and Falkenstein et al. (1999) actually showed that subjects who committed fewer false alarms

had earlier No-Go N2s than subjects who committed the most false alarms. Considering that in our case, the N2 may rather reflect conflict detection than response inhibition, an age-related decrease in N2 latency could reflect a more efficient conflict monitoring system in older adults. Indeed, early conflict detection and resolution may facilitate subsequent action suppression in seniors, enabling them to maintain their good performance throughout the duration of the task.

We also found specificities in seniors in regard to the general recruitment of processes related to attentional resources. First, Go-P3 amplitude, which is typically used as a measure of resource allocation (Isreal, Chesney, Wickens, & Donchin 1980, Kahneman, 1973; Mangun & Hillyard, 1990), was higher in seniors than in juniors. Whereas this component is usually found to decrease with age (Falkenstein et al., 2002; Picton et al., 1984), its age-related increase in our study suggests a more substantial increase in motivated activation of attentional systems in seniors throughout the duration of the task. In the same way, our results show that, regardless of the type of stimulus (Go or No-Go), the P2 component over the fronto-central electrodes was much larger in older adults than in their younger counterparts. Enlarged P2 amplitudes in seniors have already been reported by several studies that used auditory paradigms (Amenedo & Diaz, 1999; Anderer et al., 1996; Getzmann, Gajewski, & Falkenstein, 2013; Pfefferbaum, Ford, Roth, & Kopell, 1980). Regarding the visual P2, an age-related increase in its amplitude has been previously observed in a Go/No-Go task, but it was found over occipital electrodes and on irrelevant No-Go stimuli (Vallesi et al., 2009). These authors viewed this age effect as a deficit in the capacity to withdraw processing resources from irrelevant stimuli at early stages of perceptual analysis, suggesting that P2 amplitude over occipital sites was rather related to bottom-up attentional processing. In our case, the age-related increase in P2 amplitude over fronto-central sites could be related to resource allocation. Actually, this component has already been linked to attention allocation at early stages of perceptual processing in other visual paradigms (Gajewski, Stoerig, & Falkenstein, 2008; Hillyard & Anllo-Vento, 1998; Novak, Ritter, & Vaughan 1992; Potts, 2004; Wild-Wall, Falkenstein, & Gajewski, 2012). More precisely, this component has been conceptualized as a marker of the activation of top-down attentional control over the perceptual processing of task-relevant stimulus

dimensions under attend conditions (Luck & Hillyard, 1994). The globally larger P2 amplitude we found in older adults may reflect the use of more attentional resources throughout the course of the task in this group than in the younger group. Regarding P2 latency, which has been linked to top-down processes involved in the evaluation of the motivational salience of a stimulus (Riis et al., 2009), the earlier P2 latencies displayed by our older participants could indicate that, compared to young adults, they attributed a higher motivational value to the stimuli they attended.

Regarding the second aim of the study, contrary to our expectations, we did not observe any differentiated effect of time on task on processes related to inhibition or attentional resources as a function of age. Still, our results on planned comparisons showed increased No-Go P3 amplitude over time only in older adults are worth discussing even though the interaction between age and period on the P3 was not significant. Actually, this effect may be evidence for an increased need for inhibitory processes over time specific to older adults. Enhanced P3 amplitudes in No-Go trials in older individuals were already evidenced by Vallesi and colleagues (Vallesi, 2011; Vallesi & Stuss, 2010; Vallesi et al., 2009), and were interpreted by the authors as increased difficulty in suppressing well-learned prepotent Go responses with age. In their study, Vallesi and Stuss (2010) reported increased No-Go P3 amplitudes in older adults that were also positively correlated with the amplitude of the lateralized readiness potential. These authors interpreted this finding as an indication of a greater need for compensatory inhibition of a partial response in the older group. In accordance with previous reports, these authors then suggested that the suppression of cognitive and neural processing of non-target information became less efficient with age (Fabiani, Low, Wee, Sable, & Gratton, 2006; Gazzaley, Cooney, Rissman, & D'Esposito, 2005; Hasher & Zacks, 1988; Hasher, Zacks, & May, 1999; Wild-Wall & Falkenstein, 2010). Our findings may thus suggest that older adults experienced increased difficulty in suppressing motor responses in No-Go trials over the watch-keeping period, and that, as the task advanced, they had to recruit more compensatory inhibitory mechanisms to succeed in suppressing these irrelevant responses. As the task became more challenging with time and inhibiting automatic responses consequently became more difficult, older adults may have invested more attentional effort (Sarter, Gehring, & Kozak, 2006) to keep their error rates

low. However, stronger statistical evidence would be needed to confirm those results, which suggest an increase in the compensatory ability of older adults with time on task.

Finally, concerning our third objective, which was to assess age differences in the activation of brain areas underlying processes related to inhibition, we did not observe any age-related posteriorization of the No-Go N2 reported in previous studies (Lucci et al., 2013; Washer et al., 2011; Willemsen et al., 2011). This anterior-posterior shift in the topography of the N2 has been interpreted as less efficient action suppression with aging, involving the recruitment of additional parietal areas. In the present study, although older subjects had significantly lower N2 amplitudes than younger adults over frontal sites (Fz), they did not concomitantly exhibit larger amplitudes over parietal sites. Thus, in our case, more efficient inhibition of responses in target trials by older adults cannot be explained by compensatory recruitment of additional posterior areas, but may rather be explained by more efficient conflict detection and resolution, as discussed above with regard to N2 latency. This age-related posteriorization of inhibitory processing usually reported in the literature contrasts with the anteriorization pattern typically observed in seniors in regard to the No-Go P3 (Fallgatter et al., 1999; Friedman et al., 1997; Lucci et al., 2013), and which we also observed in the present study. First, it should be noted that the No-Go P3 has different and dissociable functional meanings according to the scalp location: it is assumed to reflect response suppression over anterior sites, and thus it is larger on critical No-Go trials than on Go trials, while on posterior sites the No-Go P3 is rather related to stimulus evaluation and thus its amplitude depends on probability – the rarer the event, the larger the P3 (Coles & Rugg, 1995; Nasman & Rosenfeld, 1990; Vallesi, 2011; Vallesi & Stuss, 2010). In the present case, an age-related increase in No-Go P3 amplitude was observed in the frontal scalp areas, which suggests a need for increased recruitment of frontally-mediated processes to successfully inhibit response upon the detection of critical stimuli. Thus our results are compatible with findings of age-related frontal over-recruitment reported by imaging studies, even though it is important to note that the use of the ERP technique does not enable us to draw confident inferences regarding the neural substrates of cognitive processes that are reflected in ERP components. Frontal over-recruitment has been interpreted as evidence for compensatory mechanisms initiated to counteract processing

deficiencies in posterior areas (Lucci et al., 2013; O'Connell et al., 2012; Reuter-Lorenz & Park, 2010). Age-related overactivation of frontal regions that are also activated in younger adults and/or of additional frontal regions, has been considered to be paradoxical since frontal regions are highly susceptible to age related-atrophy (Raz, 2008) but are also typically regions where evidence for compensation tends to be the most pronounced (Reuter-Lorenz & Cappell, 2008). Indeed, in most studies, over-recruitment of frontal regions in older relative to younger adults is accompanied by similar levels of performance in both groups, suggesting a successful compensatory role for such patterns of frontal overactivation, without which performance decrement would occur (Reuter-Lorenz & Lustig, 2005). In our case, increased controlled processing by scalp frontal over-recruitment in critical No-Go trials may thus have been beneficial for older adults, leading to successful response inhibition, and enabling them to perform better than their younger counterparts throughout the course of the task. This interpretation is also strengthened by results showing that it was the older subjects who produced low error rates who differed from their matching younger counterparts with regard to frontal activation on critical trials.

In conclusion, our results showing that in a Go/No-Go sustained attention task, older adults maintained a good level of performance over time on task while younger subjects exhibited a vigilance decrement can be explained by age differences in the recruitment of cognitive processes related to inhibition and the allocation of attentional resources, both in terms of their level of recruitment and in the activation of brain regions underlying these processes. Although no differential effects of time on task according to age were observed for components related to resource allocation (P2 and Go-P3), overall enhanced stimulus processing at both early and late stages -as evidenced by larger amplitudes of these components in older adults- suggest that the older subjects invested more resources in task performance. In addition, overactivation of the frontal scalp regions underlying inhibitory processing in seniors (reflected in the topography of the No-Go P3) may have played a compensatory role, enabling them to perform better than juniors throughout the duration of the task.

References

- Amenedo, E., & Díaz, F. (1999). Ageing-related changes in the processing of attended and unattended standard stimuli. *Neuroreport*, *10*(11), 2383-2388. doi: doi:10.1097/00001756-199908020-00030
- Anderer, P., Semlitsch, H. V., & Saletu, B. (1996) Multichannel auditory event-related brain potentials: effects of normal aging on the scalp distribution of N1, P2, N2 and P300 latencies and amplitudes. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *99*, 458–472. doi: 10.1016/S0013-4694(96)96518-9
- Brache, K., Scialfa, C., & Hudson, C. (2010). Aging and vigilance: who has the inhibition deficit? *Experimental Aging Research*, *36*(2), 140–152. doi: 10.1080/03610731003613425
- Brébion, G. (2001). Language processing, slowing, and speed/accuracy trade-off in the elderly. *Experimental Aging Research*, *27*, 137–150. doi: 10.1080/036107301750073999
- Carriere, J. S., Cheyne, J. A., Solman, G. J., & Smilek, D. (2010). Age trends for failures of sustained attention. *Psychology and Aging*, *25*(3), 569–574. doi: 10.1037/a0019363
- Cheyne, J. A., Carriere, J. S. A., & Smilek, D. (2006). Absent-mindedness: Lapses in conscious awareness and everyday cognitive failures. *Consciousness and Cognition*, *15*, 578–592. doi: 10.1016/j.concog.2005.11.009
- Coles, M. G. H., & Rugg, M. D. (1995). Event-related brain potentials: An introduction. In: M. D. Rugg, & Coles, M. G. (Eds.), *Electrophysiology of mind: Event-related brain potentials and cognition*. New York: Oxford University Press.
- Czigler, I., Csibra, G., & Ambro, A. (1996). Aging, stimulus identification and the effect of probability: An event-related potential study. *Biological Psychology*, *43*(1), 27–40. doi: 10.1016/0301-0511(95)05173-2

- Davies, D. R., & Parasuraman, R. (1982). *The psychology of vigilance*. London, New York: Academic Press.
- Donkers F. C. L., & van Boxtel, G. J. M. (2004) The N2 in go/no-go task reflects conflict monitoring not response inhibition. *Brain and Cognition*, *56*, 165–176. doi: 10.1016/j.bandc.2004.04.005
- Endrass, T., Schreiber, M., & Kathmann, N. (2012). Speeding up older adults: Age-effects on error processing in speed and accuracy conditions. *Biological Psychiatry*, *89*, 426–432. doi: 10.1016/j.biopsycho.2011.12.005
- Fabiani, M., Low, K. A., Wee, E., Sable, J. J., & Gratton, G. (2006). Reduced suppression or labile memory? Mechanisms of inefficient filtering of irrelevant information in older adults. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*, 637–650. doi:10.1162/jocn.2006.18.4.637
- Falkenstein, M., Hoormann, J., & Hohnsbein, J. (1999). ERP components in go/nogo tasks and their relation to inhibition. *Acta Psychologica*, *101*, 267–291. doi: 10.1016/S0001-6918(99)00008-6
- Falkenstein, M., Hoormann, J., & Hohnsbein, J., (2001). Changes of error-related ERPs with age. *Experimental Aging Research*, *138*(2), 258–262. doi: 10.1007/s002210100712
- Falkenstein, M., Hoormann, J., & Hohnsbein, J. (2002). Inhibition-related ERP components: Variation with modality, age, and time-on-task. *Journal of Psychophysiology*, *16*, 167–175. 10.1027//0269-8803.16.3.167
- Falkenstein, M., Koshlykova, N. A., Kiroj, V. N., Hoormann, J., & Hohnsbein, J. (1995). Late ERP components in visual and auditory Go/No-Go tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *96*, 36–43. doi:10.1016/0013-4694(94)00182-K
- Fallgatter, A. J., Mueller, T. J., & Strik, W. K. (1999). Age-related changes in the brain electrical correlates of response control. *Clinical Neurophysiology*, *110*(5), 833-838. doi: 10.1016/S1388-2457(99)00022-X

- Forstmeier, S., & Maercker, A. (2008). Motivational reserve: lifetime motivational abilities contribute to cognitive and emotional health in old age. *Psychology and Aging, 23*(4), 886–899. doi: 10.1037/a0013602
- Friedman, D., Kazmerski, V., & Fabiani, M. (1997). An overview of age-related changes in the scalp distribution of P3b. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section, 104*(6), 498-513. doi: 10.1016/S0168-5597(97)00036-1
- Gajewski, P. D., Stoerig, P., & Falkenstein, M. (2008). ERP correlates of response selection in a response conflict paradigm. *Brain Research, 1189*, 127–134. doi:10.1016/j.brainres.2007.10.076
- Garcia-Larrea, L., Lukaszewicz, A. C., & Mauguiere, F. (1992). Revisiting the oddball paradigm. Non-target vs. neutral stimuli and the evaluation of ERP attentional effects. *Neuropsychologia 30*(8), 723–741. doi: 10.1016/0028-3932(92)90042-K
- 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*, 1298–1300. doi: 10.1038/nn1543
- Getzmann, S., Gajewski, P. D., & Falkenstein, M. (2013). Does age increase auditory distraction? Electrophysiological correlates of high and low performance in seniors. *Neurobiology of aging, 34*(8), 1952-1962. doi: 10.1016/j.neurobiolaging.2013.02.014
- Giambra, L. M. (1989). Task-unrelated-thought frequency as a function of age: a laboratory study. *Psychology and Aging, 4*(2), 136–143. doi: 10.1037/0882-7974.4.2.136
- Gratton, G., Coles, M. G., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 55*, 468–484. doi: 10.1016/0013-4694(83)90135-9
- Hämmerer, D., Li, S. C., Muller, V., & Lindenberger, U. (2010). An electrophysiological study of response conflict processing across the lifespan: Assessing the roles of conflict

- monitoring, cue utilization, response anticipation, and response suppression. *Neuropsychologia*, 48, 3305–3316. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2010.07.014
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of a multidimensional workload rating scale: Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Human mental workload* (pp. 139–183). Amsterdam: Elsevier.
- 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, Vol. 22* (pp. 193–225). New York: Academic Press.
- Hasher, L., Zacks, R. T., & May, C. P. (1999). Inhibitory control, circadian arousal, and age. In: D. Gopher & A. Koriati (Eds.), *Attention and Performance XVII, Cognitive Regulation of Performance: Interaction of Theory and Application* (pp. 653–675). Cambridge, MA: MIT Press.
- Hess, T. M., Emery, L., & Neupert, S. D. (2012). Longitudinal relationships between resources, motivation, and functioning. *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 67(3), 299–308. doi: 10.1093/geronb/gbr100
- Hester, R., Foxe, J. J., Molholm, S., Shpaner, M., & Garavan, H. (2005). Neural mechanisms involved in error processing: a comparison of errors made with and without awareness. *Neuroimage*, 27(3), 602–608. doi: 10.1016/j.neuroimage.2005.04.035
- Hillyard, S. A., & Anllo-Vento, L. (1998). Event-related brain potentials in the study of visual selective attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95, 781–787.
- Hoffmann, S., & Falkenstein, M. (2011). Aging and error processing: age related increase in the variability of the error-negativity is not accompanied by increase in response variability. *PLoS One*, 6(2), e17482. doi: 10.1371/journal.pone.0017482

- Isreal, J. B., Chesney, G. L., Wickens, C. D., & Donchin, E. (1980). P300 and tracking difficulty: Evidence for multiple resources in dual-task performance. *Psychophysiology*, *17*, 259-273. doi: 10.1111/j.1469-8986.1980.tb00146.x
- Jackson, J. D., & Balota, D. A. (2012). Mind-wandering in younger and older adults: converging evidence from the Sustained Attention to Response Task and reading for comprehension. *Psychology and Aging*, *27*(1), 106–119. doi: 10.1037/a0023933
- Jodo, E., & Kayama, Y. (1992). Relation of a negative ERP component to response inhibition in a Go/No-go task. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *82*, 477–482. doi: 10.1016/0013-4694(92)90054-L
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Kok, A. (1986). Effects of degradation of visual stimulation on components of the event-related potential (ERP) in Go/NoGo reaction tasks. *Biological Psychology*, *23*, 21–38. doi: 10.1016/0301-0511(86)90087-6
- Lucci, G., Berchicci, M., Spinelli, D., Taddei, F., & Di Russo, F. (2013). The effects of aging on conflict detection. *PloS one*, *8*(2), e56566. doi: 10.1371/journal.pone.0056566
- Luck, S. J., & Hillyard, S. A. (1994). Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search. *Psychophysiology*, *31*, 291 – 308. doi: 10.1111/j.1469-8986.1994.tb02218.x
- Mackworth, N. H. (1957). Some factors affecting vigilance. *The Advancement of Science*, *53*, 389–393.
- Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. (1990). Allocation of visual attention to spatial locations: Trade-off functions for event-related brain potentials and detection performance. *Perception and Psychophysics*, *47*, 532–550. doi: 10.3758/BF03203106
- Mathalon, D. H., Bennett, A., Askari, N., Gray, E. M., Rosenbloom, M. J., & Ford, J. M. (2003). Response-monitoring dysfunction in aging and Alzheimer's disease: an event-related

- potential study. *Neurobiology of Aging*, 24(5), 675–685. doi: 10.1016/S0197-4580(02)00154-9
- Matthews, G., Joyner, L., Gilliland, K., Campbell, S. E., Falconer, S., & Huggins, J. (1999). Validation of a comprehensive stress state questionnaire: Towards a state 'Big Three'? In I. Mervielde, I. J. Deary, F. De Fruyt, & F. Ostendorf (Eds.), *Personality psychology in Europe* (Vol. 7, pp. 335–350). Tilburg, the Netherlands: Tilburg University Press.
- McAvinue, L. P., Habekost, T., Johnson, K. A., Kyllingsbæk, S., Vangkilde, S., Bundesen, C., & Robertson, I. H. (2012). Sustained attention, attentional selectivity, and attentional capacity across the lifespan. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74(8), 1570–1582. doi: 10.3758/s13414-012-0352-6
- McVay, J. C., Meier, M. E., Touron, D. R., & Kane, M. J. (2013). Aging ebbs the flow of thought: Adult age differences in mind wandering, executive control, and self-evaluation. *Acta Psychologica*, 142, 136–147. doi: 10.1016/j.actpsy.2012.11.006
- Nasman, V. T., & Rosenfeld, J. P. (1990). Parietal P3 response as an indicator of stimulus categorization: increased P3 amplitude to categorically deviant target and nontarget stimuli. *Psychophysiology*, 27(3), 338–350. doi: 10.1111/j.1469-8986.1990.tb00393.x
- Nieuwenhuis, S., Yeung, N., van den Wildenberg, W., & Ridderinkhof, K. R. (2003). Electrophysiological correlates of anterior cingulate function in a Go/NoGo task: Effects of response conflict and trial type frequency. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 3, 17–26. doi: 10.3758/CABN.3.1.17
- Novak, G., Ritter, W., & Vaughan Jr, H. G. (1992). Mismatch detection and the latency of temporal judgements. *Psychophysiology*, 29(4), 398–411. doi: 10.1111/j.1469-8986.1992.tb01713.x
- O'Connell, R. G., Balsters, J. H., Kilcullen, S. M., Campbell, W., Bokde, A. W., Lai, R., Upton, N., & Robertson, I. H. (2012). A simultaneous ERP/fMRI investigation of the P300 aging

- effect. *Neurobiology of aging*, 33(10), 2448-2461. doi: 10.1016/j.neurobiolaging.2011.12.021
- Parasuraman, R. (1986). Vigilance, monitoring, and search. In: K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance Vol. II, Cognitive processes and performance*. New York: Wiley.
- Parasuraman, R., Warm, J. S., & See, J. E. (1998). Brain systems of vigilance. In: R. Parasuraman (Ed.), *The attentive brain*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Pfefferbaum, A., & Ford, J. M. (1988). ERPs to stimuli requiring response production and inhibition: Effects of age, probability and visual noise. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 71, 55–63. doi: 10.1016/0168-5597(88)90019-6
- Pfefferbaum, A., Ford, J. M., Roth, W. T., & Kopell, B. S. (1980). Age-related changes in auditory event-related potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 49(3), 266-276. doi: 10.1016/0013-4694(80)90221-7
- Pfefferbaum, A., Ford, J. M., Weller, B. J., & Kopell, B. S. (1985). ERPs to response production and inhibition. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 60, 423–434. doi: 10.1016/0013-4694(85)91017-X
- Picton, T. W., Stuss, D. T., Champagne, R. F., & Nelson, R. F. (1984). The effects of age on human event-related potentials. *Psychophysiology*, 21, 312–325. doi: 10.1111/j.1469-8986.1984.tb02941.x
- Polich, J. (1996) Meta-analysis of P300 normative aging studies. *Psychophysiology*, 33, 334–353. doi: 10.1111/j.1469-8986.1996.tb01058.x
- Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118, 2128–2148. doi: 10.1016/j.clinph.2007.04.019
- Polich, J., & Kok, A. (1995). Cognitive and biological determinants of P300: an integrative review. *Biological Psychology*, 41, 103–146. doi: 10.1016/0301-0511(95)05130-9

- Potts, G. F. (2004). An ERP index of task relevance evaluation of visual stimuli. *Brain and Cognition, 56*(1), 5–13. doi: 10.1016/j.bandc.2004.03.006
- Raz, N. (2008). 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.), *Handbook of aging and cognition-II* (pp. 1–90). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Reuter-Lorenz, P. A., & Cappell, K. (2008). Neurocognitive aging and the compensation hypothesis. *Current Directions in Psychological Science, 18*, 177–182.
- Reuter-Lorenz, P. A., & Lustig, C. (2005). Brain aging: reorganizing discoveries about the aging mind. *Current opinion in neurobiology, 15*(2), 245–251.
- Reuter-Lorenz, P. A., & Park, D. C. (2010). Human neuroscience and the aging mind: a new look at old problems. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences, 65*(4), 405-415. doi: 10.1093/geronb/gbq035
- Riis, J. L., Chong, H., McGinnis, S., Tarbi, E., Sun, X., Holcomb, P. J., Rentz, D. M., & Daffner, K. R. (2009). Age-related changes in early novelty processing as measured by ERPs. *Biological Psychology, 82*, 33–44. doi: 10.1016/j.biopsycho.2009.05.003
- Roberts, L. E., Rau, H., Lutzenberger, W., & Birbaumer, N. (1994). Mapping P300 waves onto inhibition: Go/No-Go discrimination. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section, 92*(1), 44-55. doi: 10.1016/0168-5597(94)90006-X.
- Robertson, I. H., Manly, T., Andrade, J., Baddeley, B. T., & Yiend, J. (1997). 'Oops!': performance correlates of everyday attentional failures in traumatic brain injured and normal subjects. *Neuropsychologia, 35*(6), 747–758. doi: 10.1016/S0028-3932(97)00015-8
- Roche, R. A. P., Garavan, H., Foxe, J. J., & O'Mara, S. M. (2005). Individual differences discriminate event-related potentials but not performance during response inhibition. *Experimental Brain Research, 160*, 60–70. doi: 10.1007/s00221-004-1985-z

-
- Ryan, R. M., La Guardia, J. G., Solky-Butzel, J., Chirkov, V., & Kim, Y. (2005). On the interpersonal regulation of emotions: Emotional reliance across gender, relationships, and cultures. *Personal Relationships, 12*(1), 145–163. doi: 10.1111/j.1350-4126.2005.00106.x
- Sarter, M., Gehring, W. J., & Kozak, R. (2006). More attention must be paid: the neurobiology of attentional effort. *Brain Research Reviews, 51*, 145–160. doi: 10.1016/j.brainresrev.2005.11.002
- Smallwood, J., Davies, J. B., Heim, D., Finnigan, F., Sudberry, M. V., O'Connor, R. C., & Obonsawin, M. (2004). Subjective experience and the attentional lapse: task engagement and disengagement during sustained attention. *Consciousness and Cognition, 4*, 657–690. doi: 10.1016/j.concog.2004.06.003
- Smallwood, J., Obonsawin, M. C., & Heim, S. D. (2003). Task Unrelated Thought: the role of distributed processing. *Consciousness and Cognition, 12*(2), 169–189. doi: 10.1016/S1053-8100(02)00003-X
- Staub, B., Doignon-Camus, N., Bacon, E., & Bonnefond, A. (2014). Investigating sustained attention ability in the elderly by using two different approaches: Inhibiting ongoing behavior versus responding on rare occasions. *Acta Psychologica, 146*, 51-57. doi: 10.1016/j.arr.2012.12.001
- Stevenson, H., Russell, P. N., & Helton, W. S. (2011). Search asymmetry, sustained attention, and response inhibition. *Brain and Cognition, 20*, 1732–1737. doi: 10.1016/j.bandc.2011.08.007
- Tachibana, H., Aragane, K., & Sugita, M. (1996). Age-related changes in event-related potentials in visual discrimination tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 100*, 299–309. doi: 10.1016/0168-5597(96)95108-4
- Teichner, W. H. (1974). The detection of a simple visual signal as a function of time on watch. *Human Factors, 16*, 339–353. doi:10.1177/001872087401600402

- Thackray, R. I., & Touchstone, R. M. (1981). Age-related differences in complex monitoring performance. (FAA-AM-81-12). Oklahoma City: FAA civil Aeromedical Institute.
- Tomprowski, P. D., & Tinsley, V. F. (1996). Effects of memory demand and motivation on sustained attention in young and older adults. *American Journal of Psychology*, *109*(2), 187–204. doi: 10.2307/1423272
- Vallesi, A. (2011). Targets and non-targets in the aging brain: A go/nogo event related potential study. *Neuroscience Letters*, *487*, 313–317. doi: 10.1016/j.neulet.2010.10.046
- Vallerand, R. J., O'Connor, B. P., & Hamel, M. (1995). Motivation in later life: Theory and assessment. *The International Journal of Aging & Human Development*, *41*(3), 221–238. doi: 10.2190/y/lfm-dgue-hrl2-vwlg
- Vallesi, A., & Stuss, D. T. (2010). Excessive sub-threshold motor preparation for nontarget stimuli in normal aging. *Neuroimage*, *50*, 1251–1257. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.01.022
- Vallesi, A., Stuss, T. D., McIntosh, A. R., & Picton, T. W. (2009). Age-related differences in processing irrelevant information: Evidence from event-related potentials. *Neuropsychologia*, *47*, 577–586. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2008.10.018
- Washer, E., Falkenstein, M., & Wild-Wall, N. (2011). Age related strategic differences in processing irrelevant information. *Neuroscience Letters*, *487*, 66–69. doi: 10.1016/j.neulet.2010.09.075
- West, R., & Alain, C. (2000). Age-related decline in inhibitory control contributes to the increased Stroop effect observed in older adults. *Psychophysiology*, *37*(2), 179-189. doi: 10.1162/089892904322755593
- Wild-Wall, N., & Falkenstein, M. (2010). Age-dependent impairment of auditory processing under spatially focused and divided attention: An electrophysiological study. *Biological Psychology*, *83*, 27–36. doi: 10.1016/j.biopsycho.2009.09.011

Wild-Wall, N., Falkenstein, M., & Gajewski, P. D. (2012). Neural correlates of changes in a visual search task due to cognitive training. *Neural Plasticity*, 2012, Article ID 529057 (11 pp). doi: 10.1155/2012/529057

Willemsen, R., Falkenstein, M., Schwarz, M., Müller, T., Beste, C. (2011). Effects of aging, Parkinson's disease, and dopaminergic medication on response selection and control. *Neurobiology of Aging*, 32, 327–335. doi: 10.1016/j.neurobiolaging.2009.02.002

Rappel des résultats principaux de l'étude 3 et objectifs de l'étude 4

L'étude 3 nous a permis de confirmer la préservation des capacités d'attention soutenue chez les seniors dans les tâches d'inhibition (de type Go/No-Go). Les résultats électrophysiologiques ont également révélé chez les sujets âgés des spécificités pouvant être mises en lien directement avec leurs bonnes performances d'attention soutenue, à savoir :

- une mobilisation attentionnelle globalement plus importante comparativement aux sujets jeunes ;
- un recrutement augmenté au fil de la tâche des processus d'inhibition ;
- une activation plus importante des régions frontales pour le traitement des stimuli cibles.

Pour aller plus loin dans l'étude des effets du vieillissement normal sur les mécanismes cognitifs et neuronaux de contrôle attentionnel sous-tendant les capacités d'attention soutenue, nous les avons examinés dans une dernière étude (étude 4) en les distinguant sur la base de leur dynamique temporelle. Dans cette perspective, nous avons examiné, en nous appuyant sur des mesures de potentiels évoqués, les mécanismes de contrôle proactif, les mécanismes de contrôle réactif consécutifs au stimulus et ceux consécutifs à la réponse, mis en jeu lors de la réalisation d'une longue tâche d'inhibition de type Go/No-Go.

Etude 4

Staub, B., Doignon-Camus, N., Bacon, E., & Bonnefond, A. (in revision). Age-related differences in the recruitment of proactive and reactive control in a situation of sustained attention. *Biological Psychology*.

Age-related differences in the recruitment of proactive and reactive control in a
situation of sustained attention

Bérengère Staub, Nadège Doignon-Camus, Élisabeth Bacon & Anne Bonnefond

INSERM U1114, Pôle de Psychiatrie, Hôpital Civil de Strasbourg, France

Corresponding author: Bérengère Staub

Unité INSERM 1114, Pôle de Psychiatrie, Hôpital Civil de Strasbourg

1 place de l'Hôpital, 67091 Strasbourg Cedex, France

E-mail : berengere.staub@etu.unistra.fr

Tel: +33 3 88 11 64 45, Fax: +33 3 88 11 64 46

Abstract:

We examined ERP indices of proactive and reactive cognitive control processes in younger and older adults performing a sustained attention Go/No-Go task. Behavioral results showed that older adults were able to maintain a stable level of performance over time, while younger adults exhibited a vigilance decrement. The main ERP findings showed that in older adults, the amplitude of the pre-stimulus slow wave, a marker of proactive control, remained stable with time on task, and that the amplitude of the sustained potential, a marker of reactive control, increased with time on task. On the other hand, in younger adults, the amplitudes of both components decreased over time. Overall, older participants also exhibited larger amplitudes of the error negativity than their younger counterparts. These results suggest that age-related differences in the recruitment of proactive and reactive control over the course of the task can explain age differences in sustained attention performance.

Keywords: vigilance; aging; cognitive control; performance monitoring; event-related potentials

1. Introduction

The ability to sustain attention to a given stimulation or task over extended periods of time relies on the proper functioning of cognitive control mechanisms, which serve to regulate thoughts and actions in accordance with internal goals, and include maintaining task goals and instructions “online”, monitoring performance and error, filtering distractors, and suppressing prepotent and competitive responses (Botvinick, Braver, Barch, Carter, & Cohen, 2001; Sarter & Paolone, 2011). The Dual Mechanisms of Cognitive Control Theory (Braver, Gray, & Burgess, 2007) further proposes that cognitive control operates via two distinct modes, proactive and reactive. The proactive mode of control is a form of early selection in which goal-relevant information is actively maintained to bias attention, perception and action systems in a top-down manner. By contrast, the reactive mode of control is a late correction mechanism which reflects the bottom-up reactivation of task goals upon detection of interference. Thus these two modes of cognitive control differ in their temporal dynamics, as proactive control is engaged prior to the occurrence of critical or cognitively demanding events, while reactive control is engaged after the occurrence of such events. Consequently, proactive control is highly resource consuming, while demands on attentional resources are greatly reduced in the case of reactive control. In a situation of sustained attention, proactive and reactive modes of control interact to facilitate performance, so that a stable level of accuracy can be maintained over on the course of the task (Aron, 2011; Sarter, Givens, & Bruno, 2001). More specifically, in Go/No-Go sustained attention tasks that require the participant to respond to frequent Go stimuli and to withhold response to rare No-Go target stimuli, proactive control of attention has to be sustained across Go trials in order to maintain task goals (i.e. withhold response when an infrequent No-Go stimulus is presented), and recruitment of reactive control is critical on two occasions: upon the occurrence of No-Go trials to facilitate response inhibition, and after a response is given, notably after a failure to inhibit response on No-Go trials (i.e. after an error) (Forster, Elizalde, Castle, & Bishop, 2013).

Several ERP and behavioral indices related to proactive and reactive control processes have been identified. A sustained parietal negativity/frontopolar positivity, termed pre-stimulus slow wave, has been associated with proactive control (West &

Schwarb, 2006; West, Choi, & Travers, 2010). This component shares similarities with the contingent negative variation (CNV) associated with preparatory processing in anticipation of a stimulus (van Boxtel & Böcker, 2004) and is thus also referred to as “CNV-like modulation” (West & Schwarb, 2006). On the behavioral level, efficient performance as evidenced by fast reaction times and high levels of accuracy is assumed to reflect successful recruitment of proactive control (Braver et al., 2007; Czernochowski, Nessler, & Friedman, 2010). Two stimulus-evoked ERP components associated with reactive control processes have also been observed: the medial frontal negativity (MFN), also termed N450, a negativity that occurs between 300 and 500 ms after stimulus onset and that extends from the frontal to the parietal region of the scalp over the midline; and the sustained potential (SP), a sustained parietal positivity/lateral frontal negativity that emerges between 500 and 600 ms after stimulus onset and persists until 800-1200 ms after (Liotti, Woldorff, Perez III, & Mayberg, 2000; West, 2003; West & Alain, 2000a). The MFN has been more specifically associated with conflict detection (West, Jakubek, Wymbs, Perry, & Moore, 2005), and the SP has been associated with conflict resolution and response selection (West, 2003; West et al., 2005; West & Alain, 2000a). On the behavioral level, recruitment of reactive control upon the occurrence of critical stimuli typically results in slower responses and in decreased accuracy in such trials compared to fast trials (Braver et al., 2007). Finally, three response-evoked ERP potentials related to reactive control have been identified. The error-related negativity (ERN) is a negative component of the event-related potential that has a fronto-central distribution and peaks between 50 and 100 ms after an error has been made (Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke, 1990; Gehring, Goss, Coles, Meyer, & Donchin, 1993). It is assumed to reflect processes related to the early detection and evaluation of an error (Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke, 1991; Vidal, Hasbroucq, Grapperon, & Bonnet, 2000) and the amplitude of this component has notably been related to the participant’s level of engagement in task performance. A similar component can be observed after correct responses, the correct response-related negativity (CRN; Falkenstein, Hoormann, Christ, & Hohnsbein, 2000; Ford, 1999; Vidal et al., 2000), which has similar scalp topography as the ERN but is usually of smaller amplitude. The last component associated with error monitoring is a centro-parietal positivity occurring

between 200 and 400 ms after the onset an error, the error positivity (Pe; Falkenstein et al., 1991; Overbeek, Nieuwenhuis, & Ridderinkhof, 2005). It is believed to index conscious aspects of error processing and may reflect the allocation of attention to an error (Mathewson, Dywan, & Segalowitz, 2005). Behavioral adaptation after errors has typically been observed in the form of systematic slowing of response latencies for correct trials immediately following an error, and has thus been termed “post-error slowing” (Brewer & Smith, 1984; Rabbit, 1966).

A number of studies have investigated the effects of age on proactive and reactive control processes, but only a few of these studies have done so using the ERP technique, and to our knowledge, none has addressed this question in relation to the effects of age on sustained attention performance. And yet this question appears to be essential in view of recent results concerning age differences in sustained attention ability. Indeed, recent behavioral studies using Go/No-Go tasks have systematically shown preservation of this ability in older adults, who typically have lower overall commission error rates – but increased overall reaction time – than younger individuals (Carriere, Cheyne, Solman, & Smilek, 2010; Jackson & Balota, 2012; McVay, Meier, Touron, & Kane, 2013; but see McAvinue et al., 2013), and, in studies using a time on task perspective, older adults are typically able to maintain a stable level of performance over time while younger adults show a vigilance decrement (Brache, Scialfa, & Hudson, 2010; Staub, Doignon-Camus, Bacon, & Bonnefond, 2014). These results are paradoxical in light of the growing body of literature reporting poor performance by older adults across a variety of cognitive domains, which has been linked to age-related decline in the efficiency of cognitive control mechanisms (Braver & Barch, 2002; West, 2004). Indeed, regarding ERP markers of reactive control processes following responses, i.e. monitoring processes (CRN, ERN and Pe), several results indicate deterioration of these processes with age (Band & Kok, 2000; Falkenstein, Hoormann, & Hohnsbein, 2001; Hoffmann & Falkenstein, 2011; Mathewson et al., 2005; Nieuwenhuis et al. 2002; but see Eppinger, Kray, Mock, & Mecklinger, 2008; Pietschmann, Endrass, & Kathmann, 2011; Pietschmann, Simon, Endrass, & Kathmann, 2008) or alternatively an age-related difference in the recruitment of these processes that may reflect a compensatory increase in general monitoring in older adults (Endrass, Schreiber, & Kathmann, 2012;

Schreiber, Pietschmann, Kathmann, & Endrass, 2011). However, on a behavioral level, post-error slowing in seniors is usually similar to that in juniors, or even increased (Band & Kok, 2000; Gehring & Knight, 2000; Jackson & Balota, 2012; Nessler, Friedman, Johnson Jr, & Bersick, 2007; Nieuwenhuis et al., 2002; West & Moore, 2005). Fewer ERP data are available concerning the effects of age on stimulus-related reactive and proactive control. While studies using Stroop tasks or counting tasks mostly indicate a general deterioration of these control processes with age (West, 2004; West & Alain, 2000b; West & Schwarb, 2006), studies using functional imaging techniques rather report selective age-related impairment of proactive control processes but preservation of reactive control processes (Braver & Barch, 2002; Braver & West, 2008; Braver, Paxton, Locke, & Barch, 2009; Paxton, Barch, Racine, & Braver, 2008). Still, this age-related shift from proactive to reactive control has also been evidenced recently through ERP markers in a study which similarly found increased recruitment of reactive control concurrently with decreased use of proactive control in seniors (Kopp, Lange, Howe, & Wessel, 2014).

In the present study, our aim was to examine the effects of age on the set of cognitive control processes that facilitate sustained attention performance (i.e. proactive control, stimulus-related and response-related reactive control), to test whether age-related specificities in the recruitment of these processes could explain age-related differences in sustained attention performance, and indirectly, to shed light on the underlying causes of the vigilance decrement. To that end, we used a sustained attention Go/No-Go task combined with the event-related potential technique. We expected older adults to engage reactive control processes increasingly with time on task to compensate for a decreased capacity to implement of proactive control processes, enabling them to maintain a stable level of performance over time.

2. Material and methods

2.1. Subjects

Fifteen younger (9 females; mean age: 23.1 years; range: 18-28) and 16 older adults (8 females; mean age: 64.1 years; range: 62-68) participated in this experiment. All the

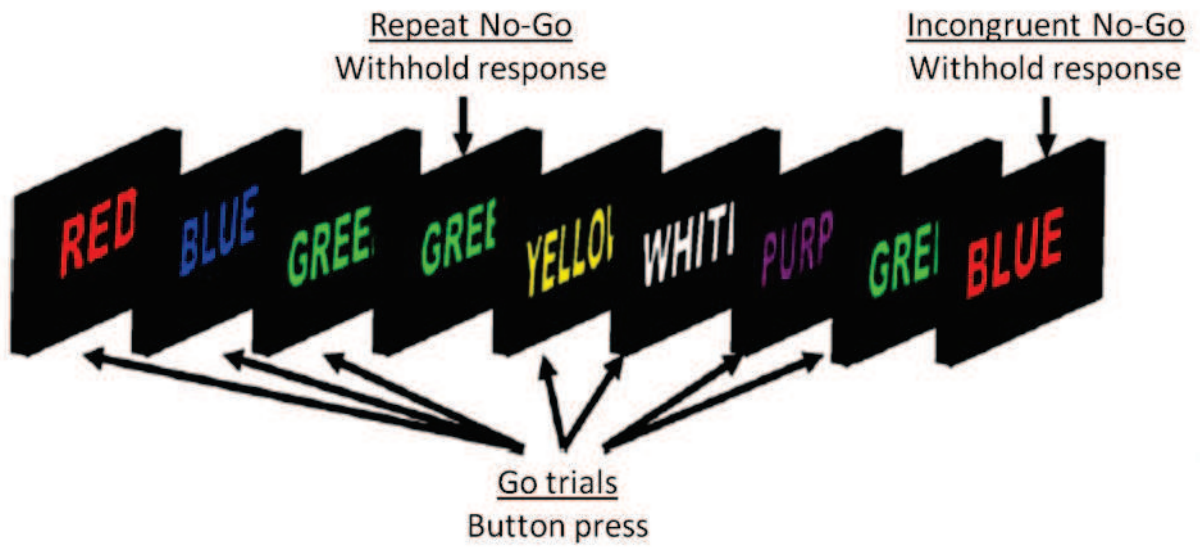


Figure 1. Experimental design (inspired by the error awareness task, Hester et al., 2005).

subjects declared that they were free of neurological and psychiatric diseases and had normal or corrected-to-normal vision. All subjects gave their written informed consent, and the study protocol was approved by the local Ethics Committee. Each subject participated in one experimental session, which lasted approximately 90 minutes. Younger and older adults did not differ in their years of education (completed years of school and university education), $t(29)=1.19$, $p = .24$ (younger adults: $M = 14$ years, $SD = 1.6$ years; older adults: $M = 13.3$ years, $SD = 1.9$ years).

2.2. Task design and procedure

All subjects completed a motor Go/No-Go response inhibition task (Figure 1). The task involved a serial stream of single color words with manipulated congruency between the word and its font color. Participants were trained to respond to each of the words with a single “Go trial” button press when the word and the font were congruent, and to withhold this response when either of two different circumstances arose (“No-Go trials”). The first was if the same word was presented in two consecutive trials, and the second was if the word and the font of the word did not match. Participants were instructed to time their button presses to the offset (i.e. end) of each stimulus, eliminating possible age-related variations in performance that would result from age differences in speed–accuracy tradeoffs. The task lasted 72 minutes. It was divided into nine blocks, each block consisting of 222 trials (198 Go trials and 24 No-Go trials). All words were presented for 600 ms followed by an inter-stimulus interval of 1500 ms and appeared 0.25° above a white fixation cross on a gray background at a distance of 100 cm. Participants were instructed to focus on the fixation cross during the task in order to minimize eye movements. Prior to starting the task, participants performed a block of 60 practice trials (corresponding to approximately 2 minutes).

Before the task, participants also completed the motivation component of the Dundee Stress State Questionnaire (DSSQ, Matthews et al., 1999), a 15-item questionnaire that assesses the participant’s motivation to perform the task at hand.

2.3. EEG recordings and analysis

Electroencephalograms (EEGs) were recorded from 32 Ag/AgCl BioSemi active electrodes mounted in an elastic cap. Electrodes were placed according to the standard 10–20 system designed to cover a large median area of the scalp (AFz, F3, F1, Fz, F2, F4, FC3, FC1, FCz, FC2, FC4, C3, C1, Cz, C2, C4, CP3, CP1, CPz, CP2, CP4, P3, P1, Pz, P2, P4, PO3, POz, PO4, O1, Oz, O2). Data were sampled at a rate of 512 Hz (bandpass filter of 0.01–100 Hz, 12 dB/octave). Using Brain Vision Analyzer software, the data were re-referenced off-line to average the two ears, and digitally filtered with a high-pass filter of 0.1 Hz (48 dB/oct) and a low-pass filter of 30 Hz (48 dB/oct). To monitor ocular artifacts, vertical and horizontal electrooculographic potentials (EOG) were recorded bipolarly. Stimulus-locked data were segmented into epochs of 200 ms before, to 1000 ms after, stimulus onset and response-locked data were segmented into epochs of 400 ms before, to 800 ms after, button press (except for the long-lasting pre-stimulus slow-wave, for which epochs were segmented from 400 ms before to 1200 ms after the response). The Gratton and Coles algorithm (Gratton, Coles, & Donchin, 1983) was used to correct eye movement and blink artifacts. Specific intervals for individual channels were rejected in each epoched trial using a semi-automated procedure, with physiological and motor artifacts identified by the following criteria: a voltage step of more than 50.0 μV between sample points, a voltage difference of 200.0 μV within a trial, a maximum of 100 μV and a minimum of -100 μV within a segment, and a maximum voltage difference of less than 0.50 μV within 100 ms intervals. The remaining stimulus-locked trials were baseline-corrected relative to the interval -200 to 0 ms, and the response-locked trials were baseline-corrected relative to the interval -400 to -200 ms. For each participant, the response-locked pre-stimulus slow wave was averaged on correct responses on Go trials that were followed by Go trials, and which occurred at the latest 1100 ms after the Go stimulus. Stimuli-locked ERPs (MFN and SP) were averaged separately for Go trials and for No-Go trials followed by a correct withhold. Finally, response-related negativities (CRN and ERN) and positivity (Pe) were averaged separately for correct responses on Go trials and errors on No-Go trials. The mean number of erroneous trials on which was based, for each subject, the averaging of the ERN was as follows: across younger adults, a mean of 25 trials in a1, 35 in a2, 40 in a3; across older adults, a mean of 21 trials in

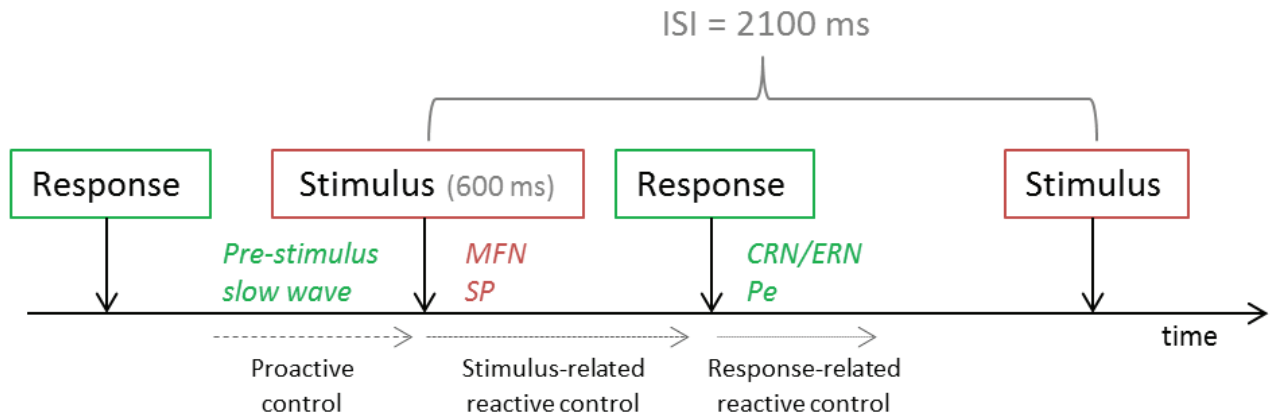


Figure 2. Sequence of task events (colors indicate the type of event on which ERP components were averaged).

The pre-stimulus slow wave, associated with proactive control, was averaged on correct Go responses. The MFN and SP, associated with stimulus-related reactive control, were averaged on Go stimuli and on No-Go stimuli followed by a correct withhold. The CRN, ERN and Pe, associated with response-related reactive control, were averaged on correct Go responses and on No-Go errors.

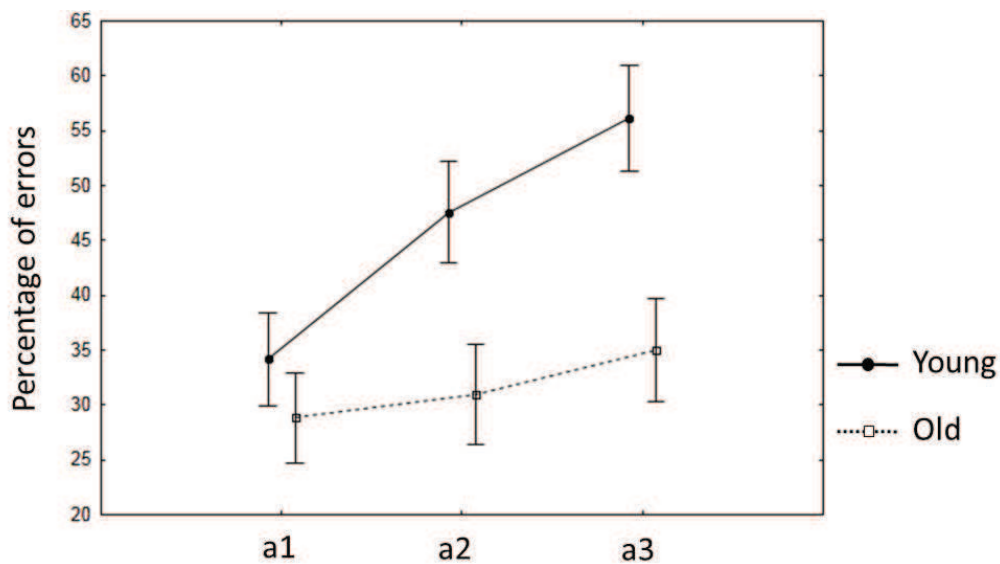


Figure 3. Interaction between age (young/old) and period (a1/a2/a3) on the percentage of errors.

Vertical bars represent standard deviations.

a1, 22 in a2, 25 in a3. Figure 2 illustrates how each component and its associated type of control were measured with regard to task events (stimulus and response).

The mean amplitude of the pre-stimulus slow wave was measured in the interval from 600 to 800 ms following response at electrode site Pz, where the maximum amplitude for this component was observed. Peak amplitude of the stimulus-locked MFN was searched for within the 200-500 ms time window at electrode site FCz, where the maximum amplitude was observed for this component. For the stimulus-locked SP, mean amplitude was measured in the time range between 500 and 700 ms. Since the visual inspection of the ERP waveforms indicated that the SP was not only observable at the usual parietal sites but also at frontal locations, it was measured at both FCz and CPz, where the maximum frontal and parietal amplitudes were observed for this component. Peak-to-peak amplitudes of the response-related negativities (CRN following correct responses and ERN following errors) were measured at electrode sites Fz and FCz, where the maximum amplitudes were observed for each component. The peak-to-peak voltage difference was calculated by subtracting the amplitude of the positive peak immediately preceding the CRN or ERN (time range: -100 to 50 ms) from the amplitude of the negative peak in the time range between 0 and 150 ms. Finally, for the Pe, mean amplitude in the time range between 250 to 350 ms was measured at electrode site CPz, where the maximum amplitude was observed for this component.

2.4. Statistical analyses

For ERP and performance analysis, the task was divided into three periods (a1/a2/a3), with each period corresponding to three task blocks, and, in terms of duration, to 24 min. For performance analysis, percentages of commission errors and reaction times were recorded. Percentages of errors in each period represent the proportion of errors on No-Go trials relative to all the No-Go trials in the period. They were subjected to analysis of variance (ANOVA), which included the between-subject factor age (young/old) and the within-subject factor period (a1/a2/a3). In order to examine post-error slowing, mean reaction times on Go trials immediately following No-Go trials were subjected to an ANOVA

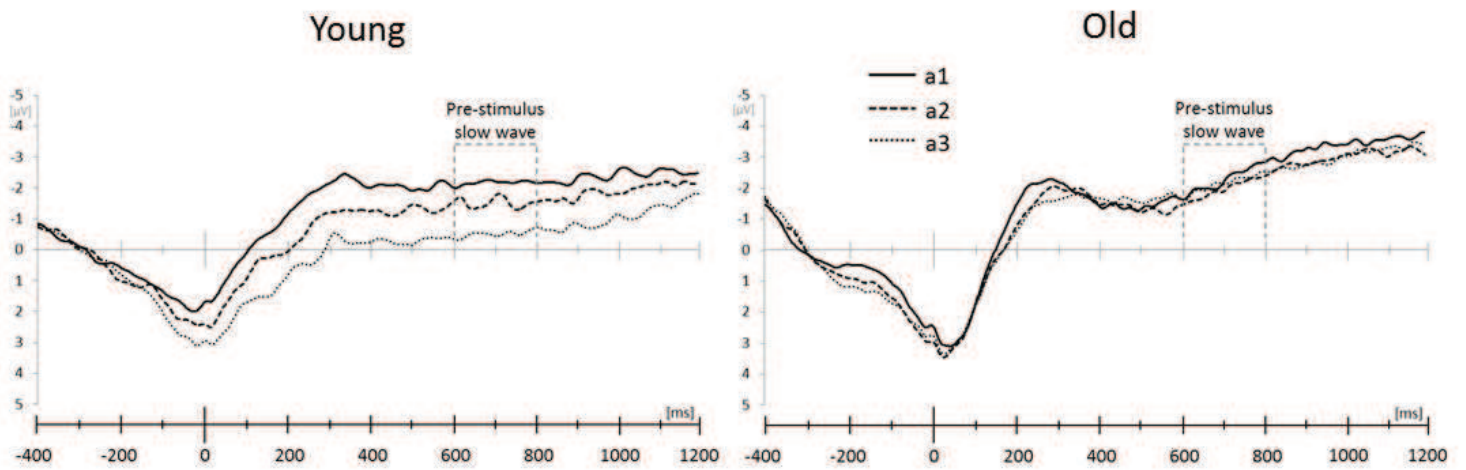


Figure 4. Response-locked ERP waveforms for correct responses on Go trials as a function of age (young/old) and period (a1/a2/a3) at electrode site Pz.

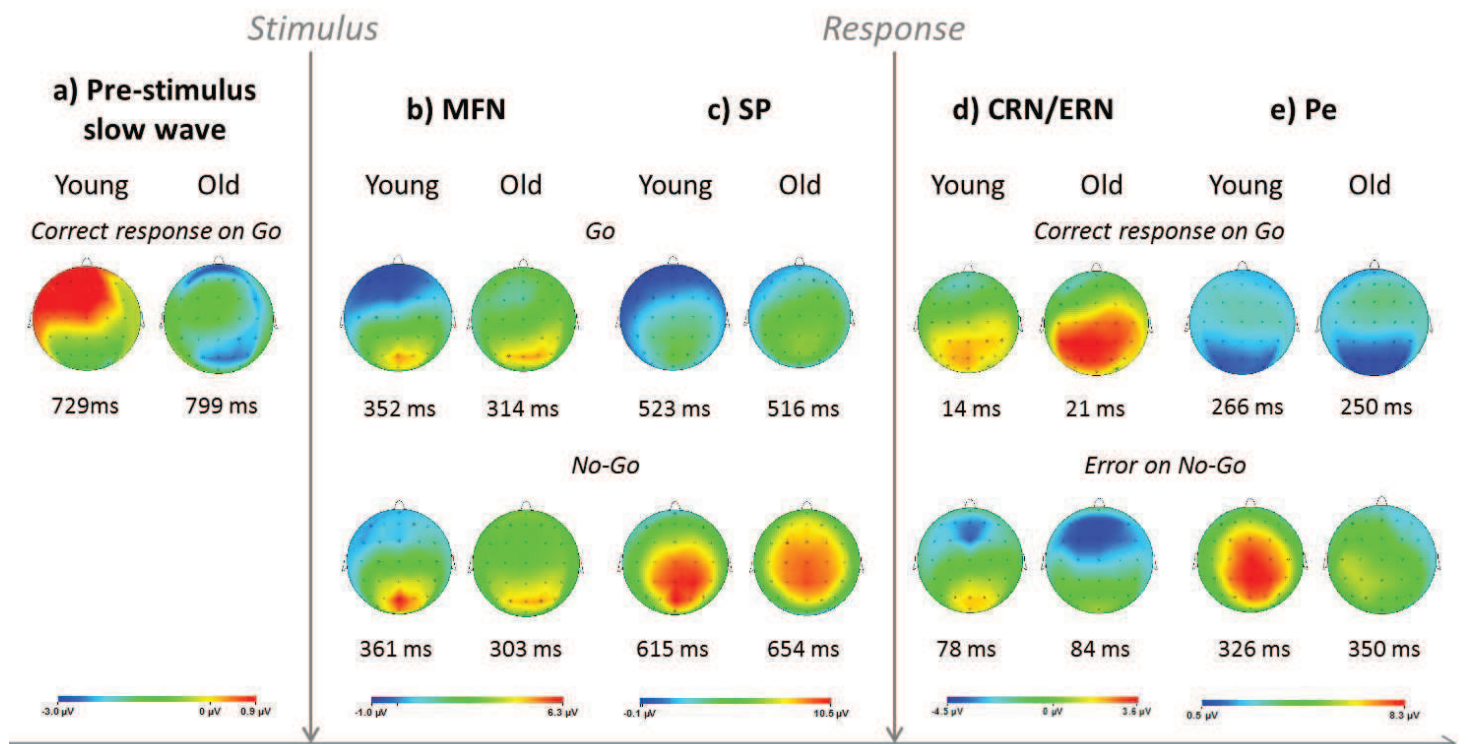


Figure 5. The scalp topographies as a function of age (young/old), stimulus type (Go/No-Go) or response type (correct response on Go/error on No-Go). The images represent activity on the scalp at the time corresponding to the maximum amplitude of each component for each group.

that included the between-subject factor age (young/old) and the within-subject factors response type on No-Go trials (correct withhold/commission error) and period (a1/a2/a3). For the ERP analysis, measures of all the components were subjected to ANOVAs that included the between-subject factor age (young/old) and the within-subject factor period (a1/a2/a3). Additional within-subject factors included stimulus type (Go/No-Go) for the MFN and SP, response type (correct response on Go trial/error on No-Go trial) for the CRN/ERN and the Pe, and electrode site for the SP (FCz/CPz) and the CRN/ERN (Fz/FCz). For the analysis of subjective data, t-tests were performed on results of the motivation component of the DSSQ. Correlational analyses were used to examine associations between behavioral measures, ERP components, and subjective measures. Correlations between electrophysiological indices of proactive control and reactive control, and between these indices and performance measures, were of particular interest to examine the hypothesized shift from proactive to reactive control over the course of the task in seniors. When main effects or interactions were significant, Bonferroni-corrected p values were reported for post-hoc comparisons.

3. Results

3.1. Performance data

The ANOVA performed on the percentage of commission errors revealed a significant interaction between age and period ($F(2,58) = 7.95, p < .001$): in the younger group, commission errors increased significantly over the course of the task (between a1 and a2, $F(1, 29) = 21.27, p < .001$, and between a1 and a3, $F(1, 29) = 39.04, p < .001$), whereas in the group of older participants, commission errors remained stable with time on task (Figure 3). Planned comparisons also indicated that the percentage of errors did not differ between the two groups in period a1 ($F(1, 29) = .84, p = 1$) and period a2 ($F(1, 29) = .84, p = .19$), but that younger adults made more commission errors than older adults in period a3 ($F(1, 29) = 10.26, p < .03$).

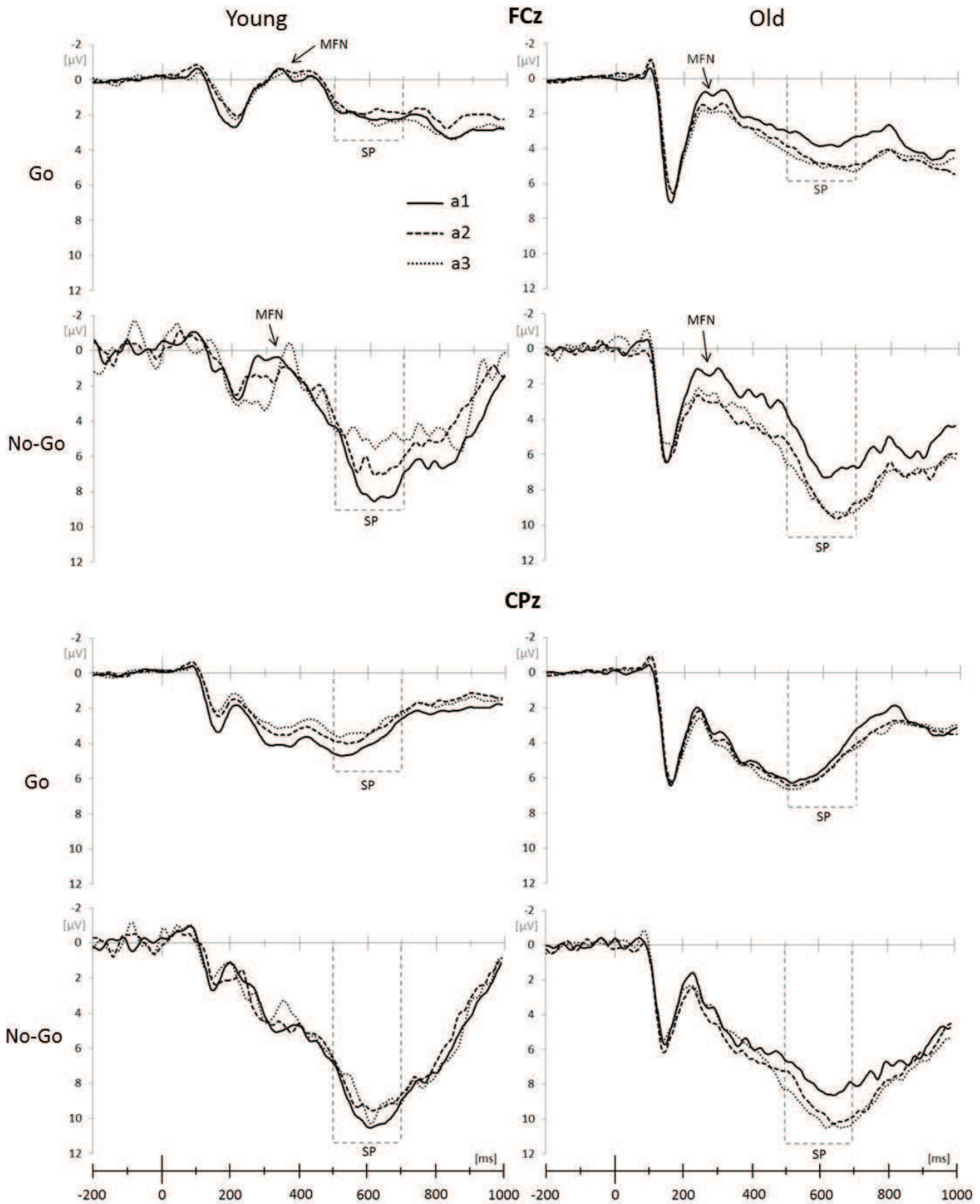


Figure 6. Stimulus-locked ERP waveforms as a function of age (young/old), period (a1/a2/a3), stimulus type (Go/No-Go) and electrode site (FCz/CPz).

The ANOVA performed on reaction times only revealed a significant effect of period ($F(2,58) = 11.180, p < .001$): reaction times decreased significantly between periods a1 ($M = 578.03$ ms, $SD = 19.01$ ms) and a2 ($M = 540$ ms, $SD = 18.93$ ms) ($F(1, 29) = 7.4, p < .01$) and between a1 and a3 ($M = 521.12$ ms, $SD = 15.42$) ($F(1, 29) = 21.8, p < .001$). No significant main effect of age ($F(1, 29) = .67, p = .42$) or interaction between age and period ($F(2, 58) = 1.09, p = .34$) was found.

Regarding the analysis of post-error slowing, no significant effects were observed.

3.2. ERP data

3.2.1. Proactive control

Figure 4 shows the grand average response-locked waveforms for both age groups at electrode Pz, in which the pre-stimulus slow wave was the most apparent, while figure 5a shows the scalp topographies for this component.

The ANOVA performed on amplitudes of the pre-stimulus slow wave revealed a significant interaction between age and period ($F(2, 58) = 5.04, p < .01$): planned comparisons indicated that in younger adults amplitudes of the pre-stimulus slow wave decreased significantly between a1 and a3 ($F(1, 29) = 14.2, p < .001$), and marginally between a2 and a3 ($F(1, 29) = 11.47, p = .09$), while in older adults, they remained stable with time on task. The main effect of age was not significant ($F(1, 29) = .51, p = .48$).

3.2.2. Stimulus-related reactive control

Figure 6 shows grand average stimulus-locked waveforms for both age groups. As can be seen in the average waveforms, the MFN was the most apparent at electrode FCz, and the SP appeared to be equally large at both FCz and CPz electrode sites. Scalp topographies for each component are represented in figure 5b and figure 5c, respectively.

The ANOVA performed on MFN amplitudes revealed a significant interaction between age and period ($F(2, 58) = 3.43, p < .04$): planned comparisons indicated that in older adults, MFN amplitudes decreased significantly between periods a1 and a2 ($F(1, 29) = 11.08, p < .03$) and marginally between a1 and a3 ($F(1, 29) = 6.47, p = .06$), while they remained

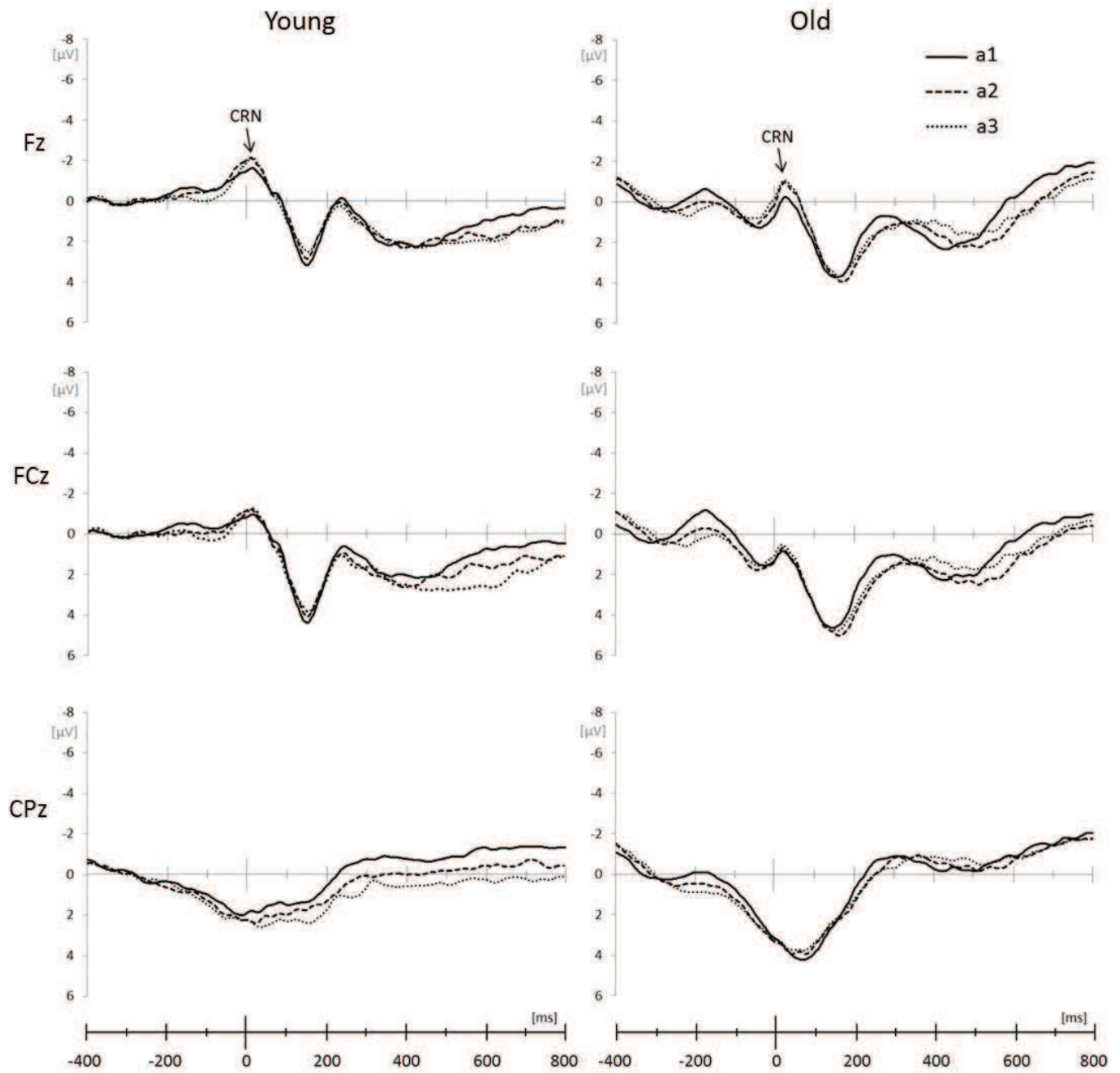


Figure 7. Response-locked ERP waveforms for correct responses on Go trials as a function of age (young/old), period (a1/a2/a3) and electrode site (Fz/FCz/CPz).

stable with time on task in younger adults. No significant effect of stimulus type was observed.

Regarding SP amplitudes, the ANOVA first revealed a significant interaction between age and period ($F(2, 58)=6.86, p < .003$): planned comparisons indicated that in older adults, SP amplitudes increased significantly between periods a1 and a3 ($F(1, 29) = 6.59, p < .05$), whereas they remained stable with time on task in younger adults. A significant interaction between age, period and stimulus type indicated that the SP increase between a1 and a3 in older adults was significant on No-Go trials ($F(1, 29) = 7.45, p < .001$; also significant between a1 and a2, $F(1, 29) = 4.73, p < .02$), but not on Go trials. Concerning younger adults, SP amplitudes remained stable on Go trials, but on No-Go trials, SP amplitudes actually decreased between the first period a1 and the last period a3 ($F(1, 29) = 4.41, p < .04$).

3.2.3. Response-related reactive control

Grand average response-locked waveforms for both age groups are depicted in figure 7 (correct responses on Go trials) and figure 8 (errors on No-Go trials). As revealed by these waveforms, CRN following correct responses were the largest at electrode Fz while ERN following errors were the largest at electrode FCz. The Pe, which was only present following errors, was largest at electrode CPz. Scalp topographies for CRN/ERN and Pe are shown in figure 5d and figure 5e, respectively.

With regard to CRN/ERN amplitudes, the ANOVA revealed a significant main effect of response type ($F(1, 29) = 213.9, p < .001$): negativities following errors (ERN) were significantly larger than negativities following correct responses (CRN). A significant interaction between age and response type was observed ($F(1, 29) = 9.16, p < .006$): planned comparisons indicated that older adults had significantly larger ERN amplitudes than younger adults ($F(1, 29) = 9.08, p < .002$), while there was no difference in CRN amplitudes between the two groups ($F(1, 29) = .03, p = 1$). The interaction between age, response type and period was not significant ($F(2, 58) = .62, p = .54$).

The ANOVA performed on Pe amplitudes revealed a significant main effect of response type ($F(1, 29) = 41.54, p < .001$): as expected, the Pe was significantly larger

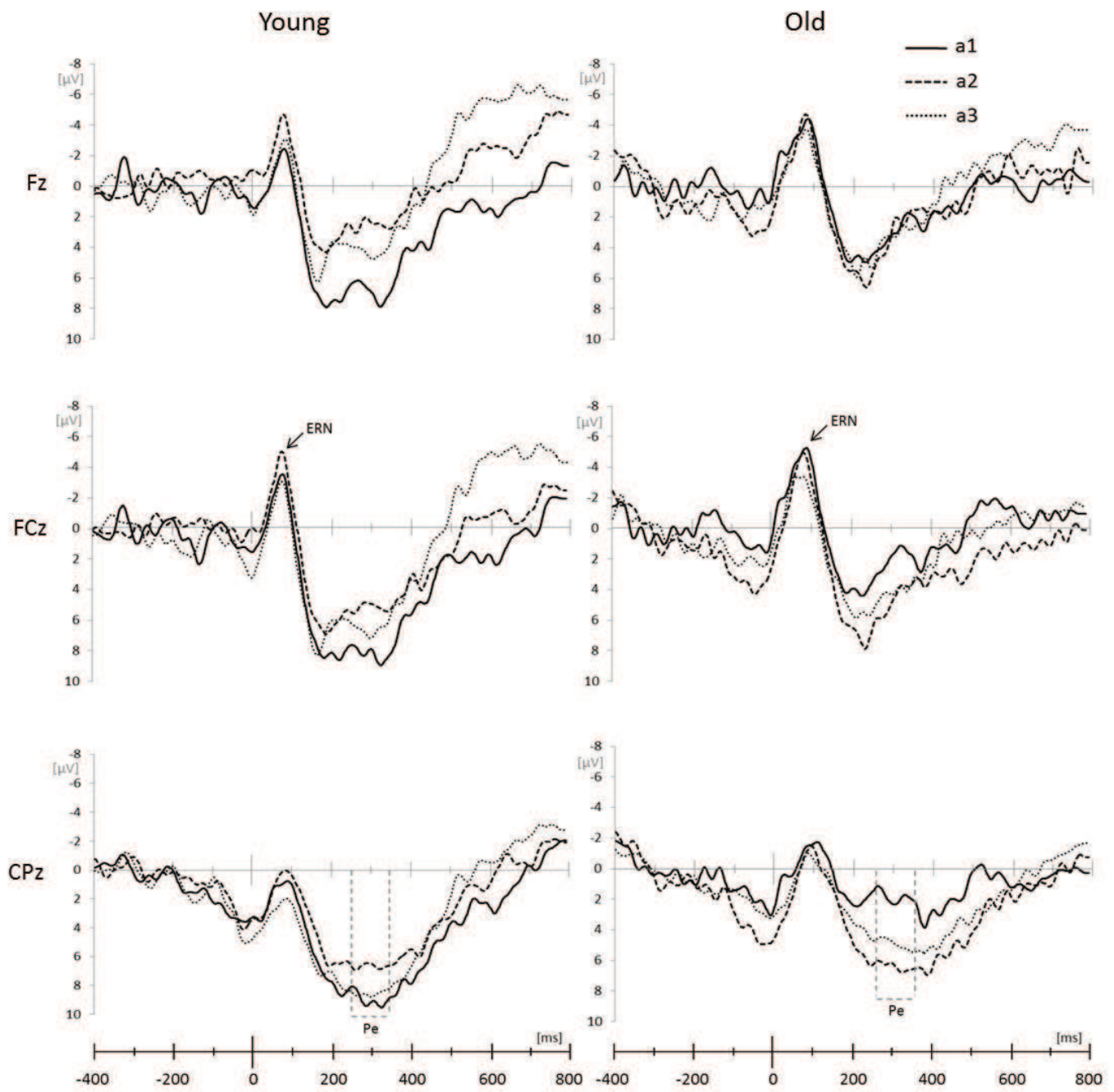


Figure 8. Response-locked ERP waveforms for errors on No-Go trials as a function of age (young/old), period (a1/a2/a3) and electrode site (Fz/FCz/CPz).

following errors than following correct responses. A significant interaction between age, period and response type and was also observed ($F(2, 58) = 3.53, p < .04$).

3.3. Subjective data

The t test performed on the motivation component of the DSSQ revealed a significant difference between the two groups ($t(29) = -2.88, p < .008$): older adults ($M = 2.6, SD = 0.28$) were more motivated than younger adults ($M = 2.14, SD = 0.56$).

3.4. Correlational analyses

Only significant correlations of interest to our question are presented in the following.

Concerning ERP indices of proactive control, since the main findings were differential effects of period as a function of age, we focused on the correlations involving these indices that were significant over at least two task periods in a given age group. We found a significant correlation between ERP indices of proactive control and performance results: a positive association between pre-stimulus slow wave values and error rate was evidenced in older subjects, in periods a2 ($r = .59, p < .02$) and a3 ($r = .65, p < .008$). This positive correlation was also evidenced in the younger group but only in the first period ($r = .53, p < .05$).

Regarding ERP correlates of reactive control following response, since no effect of period was found, correlational analyses involving these indices were performed on overall mean results. The analysis revealed that in older adults, low rates of commission errors were associated with larger CRN amplitudes over Fz ($r = -.65, p < .05$) and with larger ERN amplitudes over FCz ($r = -.51, p < .05$).

No significant correlations were found between subjective measures and performance or ERP measures.

4. Discussion

The purpose of our research was to study if age-related differences in the recruitment of proactive and reactive cognitive control processes could explain age-related differences in sustained attention. We hypothesized that in order to maintain a stable level of performance over time, older adults would increasingly engage reactive control processes with time on task to compensate for decreased capacity to implement proactive control. Our results showed that on the behavioral level, older adults were able to maintain a stable level of performance over the course of the task, while younger adults exhibited a vigilance decrement. Those results are consistent with the results of a few recent studies that reported preserved sustained attention ability in older adults performing Go/No-Go tasks (Brache et al., 2010; Carriere et al., 2010; Jackson & Balota, 2012; McVay et al., 2013; Staub et al., 2014; but see McAvinue et al., 2013). On the electrophysiological level and in accordance with our hypothesis, we demonstrate for the first time that older adults utilized reactive control processes increasingly with time on task. However, contrary to our expectations, they were also able to maintain proactive control over the course of the task.

Indeed, results concerning electrophysiological indices of proactive control showed that the amplitude of the pre-stimulus slow wave remained stable with time on task in older adults, whereas it decreased in younger adults (as evidenced by the significant interaction between age and period for this component). This age difference in the engagement of proactive control over time exactly mirrored the age difference in behavioral results: stable performance and stable engagement of proactive control throughout the course of the task in older adults, and on the contrary, a vigilance decrement and a concurrent decrease in proactive control in younger adults. This interpretation is strengthened by the correlation showing that in both groups, although more consistently in older adults, fewer errors were associated with larger amplitude of the pre-stimulus slow wave. Also and importantly, our results strongly suggest that a decrease in proactive control over time on task could be a marker of the vigilance decrement. In addition, it is worth mentioning that contrary to previous studies (West, 2004; West & Schwarb, 2006), we did not observe a general attenuation of the amplitude of the pre-stimulus slow wave in older adults compared to

younger subjects, which has been viewed as an age-related decline in the ability to implement proactive control, in line with reports from imaging studies (Jimura & Braver, 2010; Paxton et al., 2008; Velanova, Lustig, Jacoby, Buckner, 2007). This apparent discrepancy could be explained by the level of complexity, which was much lower in our task than that in the tasks used in the aforementioned studies, and thus less resource-taxing and less demanding for seniors, who have limited processing resources to begin with (Craig & Byrd, 1982; Park, 2000; Reuter-Lorenz & Lustig, 2005). Still, the task used in the present study also imposes a certain load on proactive control, but it rather originates from the need to maintain this control over a long duration, which older adults achieved successfully in the present case, unlike the younger adults, who were unable to maintain proactive control over the watch keeping period. It is also worth noting that the mean age of the senior group was a bit lower in our study than in the imaging studies previously mentioned. The increased ability of older adults to maintain a stable engagement of proactive control with time on task, and thus to exhibit a stable level of performance over time, can also be related to motivational factors. Older adults typically display greater motivation and interest than younger adults, even in tasks particularly conducive of boredom (Thackray & Touchstone, 1981; Tomporowski & Tinsley, 1996), which is known to positively affect cognitive performance (Forstmeier & Maercker, 2008; Vallerand, O'Connor, & Hamel, 1995). In the present case, subjective reports indicated that older adults were indeed more motivated than their younger counterparts to perform the task, which may in part explain their ability to maintain a good level of performance over time.

Concerning ERP indices of reactive control following stimuli, we observed differentiated effects of period on its two markers in seniors, with, on the one hand, a decrease in MFN amplitude with time on task and on the other hand, an increase in SP amplitude with time on task. These results are notably in accordance with those of Falkenstein, Hoormann, & Hohnsbein (2002), who reported differential effects of age on the processes underlying No-Go-related components. With regard to the MFN, which is considered to be a marker of conflict detection, first, it should be noted that even though conflict is typically greater on critical No-Go trials, we found no difference in MFN amplitude between Go and No-Go trials, suggesting that in the present case, conflict between two

response tendencies (execution and suppression) was equally present in every trial. Therefore our results suggest that the magnitude of this ever-present response conflict progressively decreased in our older group, perhaps as a consequence of increasing adaptation to conflict. There is indeed some evidence that the MFN is sensitive to conflict adaptation (i.e. MFN amplitude in incongruent trials is smaller in amplitude when the previous trial is also incongruent rather than congruent, West, Bailey, Tiernan, Boonsuk, & Gilbert, 2012), suggesting that older adults increasingly adapted to conflict as the task advanced. This may have resulted in more efficient response suppression, as evidenced by their success in maintaining a good level of performance over time. However, increased adaptation to conflict over the watch keeping period was apparently accompanied by a greater need for cognitive resources in the subsequent stage of conflict processing, as evidenced by results obtained in the No-Go SP, a marker of conflict resolution (West et al., 2005). Indeed, given that in the case of a Go/No-Go task, the outcome of conflict resolution on a No-Go trial is the successful inhibition of response, an increase in No-Go SP amplitude across task periods in seniors may reflect a need to allocate increased processing resources upon the occurrence of No-Go stimuli in order to succeed in withholding response (West & Alain, 2000a). In other words, as the task became more challenging with time on task, older adults may have had to engage increased amounts of attentional resources to maintain efficient functioning of reactive control processes, and thus to keep their error rates low.

Finally, with regard to ERP indices of reactive control following response, i.e. monitoring processes, although we did not observe any interaction between age and time on task on any component related to response monitoring, we found a main effect of age, which evidenced overall larger ERN amplitudes in older subjects. The increased ERN amplitude in our older group, which was maintained throughout the course of the task concomitant with their stable level of performance, is consistent with the view that the ERN triggers the adjustment of cognitive control processes in order to prevent future errors (Ridderinkhof, Ullsperger, Crone, & Nieuwenhuis, 2004). Indeed, we can assume that in older adults, ERN following errors acted as an efficient signal of a need for upregulation of reactive control on subsequent trials, enabling them to prevent their error rate from increasing. Accordingly, correlational analyses revealed that in older adults, larger ERN were associated

with a lower error rate. In addition, instructions given to our participants to prefer accuracy over speed may have facilitated the capacity of older adults to implement increased cognitive control following errors, since it has been shown that when speed is preferred over accuracy, older adults are forced to adopt a response strategy that reduces cognitive control mechanisms, and which is reflected in reduced ERN amplitudes (Endrass et al., 2012). It is worth noting that the ERN is also generally thought to be related to the motivational significance of an error (van Veen & Carter, 2006). Indeed, it was found that when subjects were told they were being evaluated by a researcher and compared to their peers, greater ERN were elicited compared to a control group (Hajcak, Moser, Yeung, & Simons, 2005), suggesting that the more engaged an individual is in the task, the larger the ERN (Santesso, Segalowitz, & Schmidt, 2005; Tops, Boksem, Wester, Lorist, & Meijman, 2006). In line with these data, subjective results showed that older adults were more motivated than their younger counterparts, and thus a greater commitment to the task may have contributed to their success in sustaining attention over the watch keeping period.

5. Conclusion

The findings of the present study show that an age-related difference in the recruitment of proactive and reactive control processes over the course of the task can explain age-related differences in sustained attention performance. In younger adults, the engagement of both proactive and stimulus-related reactive control processes in a Go/No-Go sustained attention task decreased over time, resulting in poor sustained attention performance. On the contrary, older adults were able to maintain a stable level of performance over time by maintaining proactive control throughout the course of the task by recruiting increased levels of reactive control upon the occurrence of critical stimuli as the task advanced, and by engaging overall increased reactive control after committing an error compared with younger adults. Therefore, these results challenge the view that aging is associated with a general deterioration of cognitive control processes since both proactive and reactive control processes were intact in older participants. In addition to providing some explanations for sustained attention ability in older individuals, our results also suggest that a decrease in the engagement of proactive control with time on task (as evidenced by a

decrease in pre-stimulus slow wave amplitude) could be a marker of the vigilance decrement.

References

- Aron, A. R. (2011). From reactive to proactive and selective control: developing a richer model for stopping inappropriate responses. *Biological Psychiatry, 69*, e55–68.
- Band, G. P., & Kok, A. (2000). Age effects on response monitoring in a mental-rotation task. *Biological Psychology, 51*(2-3), 201–221.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological review, 108*, 624–652.
- Brache, K., Scialfa, C., & Hudson, C. (2010). Aging and vigilance: who has the inhibition deficit? *Experimental Aging Research, 36*(2), 140–152.
- Braver, T. S., & Barch, D. M. (2002). A theory of cognitive control, aging cognition, and neuromodulation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 26*, 809–817.
- Braver, T. B., Gray, J. G., & Burgess, G. B. (2007). Explaining the many varieties of working memory variation: Dual mechanisms of cognitive control. In: A. R. A. Conway, C. Jarrold, M. J. Kane, A. Miyake, & J.N. Towse (Eds.), *Variation in Working Memory*. Oxford: Oxford University Press.
- Braver, T. S., Paxton, J. L., Locke, H. S., & Barch, D. M. (2009). Flexible neural mechanisms of cognitive control within human prefrontal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 106*(18), 7351–7356.
- Braver, T. A., & West, R. (2008). Working memory, executive control, and aging. In: F.I.M. Craik, & T. A. Salthouse (Eds.), *The Handbook of Cognition and Aging, 3rd Ed.* New York: Psychology Press.
- Brewer, N., & Smith, G. A. (1984). How normal and retarded individuals monitor and regulate speed and accuracy of responding in serial choice tasks. *Journal of Experimental Psychology: General, 113*(1), 71–93.

-
- Carriere, J. S., Cheyne, J. A., Solman, G. J., & Smilek, D. (2010). Age trends for failures of sustained attention. *Psychology and aging, 25*(3), 569–574.
- Craik, F. I. M., & Byrd, M. (1982). Aging and cognitive deficits: the role of attentional resources. In: F. I. M. Craik, & S. Trehub. (Eds.), *Aging and cognitive processes*. New York: Plenum Press.
- Czernochowski, D., Nessler, D., & Friedman, D. (2010). On why not to rush older adults—relying on reactive cognitive control can effectively reduce errors at the expense of slowed responses. *Psychophysiology, 47*(4), 637–646.
- Endrass, T., Schreiber, M., & Kathmann, N. (2012). Speeding up older adults: Age-effects on error processing in speed and accuracy conditions. *Biological psychology, 89*(2), 426–432.
- Eppinger, B., Kray, J., Mock, B., & Mecklinger, A. (2008). Better or worse than expected? Aging, learning, and the ERN. *Neuropsychologia, 46*(2), 521–539.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1990). Effects of errors in choice reaction tasks on the ERP under focused and divided attention. In: C. H. M. Brunia, A. W. K. Gaillard, & A. Kok. (Eds.), *Psychophysiological Brain Research*. Tilburg, the Netherlands: Tilburg University Press.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1991). Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalography and clinical neurophysiology, 78*(6), 447–455.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., Christ, S., & Hohnsbein, J. (2000). ERP components on reaction errors and their functional significance: a tutorial. *Biological psychology, 51*(2), 87–107.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., & Hohnsbein, J. (2001). Changes of error-related ERPs with age. *Experimental Brain Research, 138*(2), 258–262.

- Falkenstein, M., Hoormann, J., & Hohnsbein, J. (2002). Inhibition-related ERP components: Variation with modality, age, and time-on-task. *Journal of Psychophysiology, 16*(3), 167.
- Ford, J. M. (1999). Schizophrenia: the broken P300 and beyond. *Psychophysiology, 36*(6), 667–682.
- Forster, S., Elizalde, A. O. N., Castle, E., & Bishop, S. J. (2013). Unraveling the Anxious Mind: Anxiety, Worry, and Frontal Engagement in Sustained Attention Versus Off-Task Processing. *Cerebral Cortex*, bht248.
- Forstmeier, S., & Maercker, A. (2008). Motivational reserve: lifetime motivational abilities contribute to cognitive and emotional health in old age. *Psychology and aging, 23*(4), 886.
- Gajewski, P. D., & Falkenstein, M. (2013). Effects of task complexity on ERP components in Go/Nogo tasks. *International Journal of Psychophysiology, 87*(3), 273-278.
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological science, 4*(6), 385–390.
- Gehring, W. J., & Knight, R. T. (2000). Prefrontal–cingulate interactions in action monitoring. *Nature neuroscience, 3*(5), 516–520.
- Gratton, G., Coles, M. G., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and clinical neurophysiology, 55*(4), 468–484.
- Hajcak, G., Moser, J. S., Yeung, N., & Simons, R. F. (2005). On the ERN and the significance of errors. *Psychophysiology, 42*(2), 151–160.
- Hester, R., Foxe, J. J., Molholm, S., Shpaner, M., & Garavan, H. (2005). Neural mechanisms involved in error processing: a comparison of errors made with and without awareness. *Neuroimage, 27*(3), 602–608.

- Hoffmann, S., & Falkenstein, M. (2011). Aging and error processing: age related increase in the variability of the error-negativity is not accompanied by increase in response variability. *PLoS one*, 6(2), e17482.
- Jackson, J. D., & Balota, D. A. (2012). Mind-wandering in younger and older adults: Converging evidence from the sustained attention to response task and reading for comprehension. *Psychology and aging*, 27(1), 106–119.
- Jimura, K., & Braver, T. S. (2010). Age-related shifts in brain activity dynamics during task switching. *Cerebral Cortex*, 20, 1420–1431.
- Kopp, B., Lange, F., Howe, J., & Wessel, K. (2014). Age-related changes in neural recruitment for cognitive control. *Brain and cognition*, 85, 209–219.
- Liotti, M., Woldorff, M. G., Perez III, R., & Mayberg, H. S. (2000). An ERP study of the temporal course of the Stroop color-word interference effect. *Neuropsychologia*, 38(5), 701–711.
- Mathewson, K. J., Dywan, J., & Segalowitz, S. J. (2005). Brain bases of error-related ERPs as influenced by age and task. *Biological Psychology*, 70(2), 88–104.
- Matthews, G., Joyner, L., Gilliland, K., Campbell, S. E., Falconer, S., & Huggins, J. (1999). Validation of a comprehensive stress state questionnaire: Towards a state 'Big Three'?. In: I. Mervielde, I. J. Deary, F. De Fruyt, & F. Ostendorf (Eds.), *Personality psychology in Europe* (Vol. 7, pp. 335–350). Tilburg, the Netherlands: Tilburg University Press.
- McAvinue, L. P., Habekost, T., Johnson, K. A., Kyllingsbæk, S., Vangkilde, S., Bundesen, C., & Robertson, I. H. (2012). Sustained attention, attentional selectivity, and attentional capacity across the lifespan. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74(8), 1570–1582.

- McVay, J. C., Meier, M. E., Touron, D. R., & Kane, M. J. (2013). Aging ebbs the flow of thought: adult age differences in mind wandering, executive control, and self-evaluation. *Acta psychologica, 142*(1), 136–147.
- Nessler, D., Friedman, D., Johnson Jr, R., & Bersick, M. (2007). ERPs suggest that age affects cognitive control but not response conflict detection. *Neurobiology of Aging, 28*(11), 1769–1782.
- Nieuwenhuis, S., Ridderinkhof, K. R., Talsma, D., Coles, M. G., Holroyd, C. B., Kok, A., & Van der Molen, M. W. (2002). A computational account of altered error processing in older age: dopamine and the error-related negativity. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience, 2*(1), 19–36.
- Overbeek, T. J., Nieuwenhuis, S., & Ridderinkhof, K. R. (2005). Dissociable components of error processing: On the functional significance of the Pe vis-à-vis the ERN/Ne. *Journal of Psychophysiology, 19*(4), 319–329.
- Park, D.C., 2000. The basic mechanisms accounting for age-related decline in cognitive function. In: D. C. Park, & N. Schwarz. (Eds.), *Cognitive aging: A primer* (pp. 3–21). New York: Psychology Press.
- Paxton, J. L., Barch, D. M., Racine, C. A., & Braver, T. S. (2008). Cognitive control, goal maintenance, and prefrontal function in healthy aging. *Cerebral Cortex, 18*(5), 1010–1028.
- Pietschmann, M., Endrass, T., & Kathmann, N. (2011). Age-related alterations in performance monitoring during and after learning. *Neurobiology of aging, 32*(7), 1320–1330.
- Pietschmann, M., Simon, K., Endrass, T., & Kathmann, N. (2008). Changes of performance monitoring with learning in older and younger adults. *Psychophysiology, 45*(4), 559–568.

- Rabbitt, P. M. A. (1966). Errors and error correction in choice reaction tasks. *Journal of Experimental Psychology*, *71*, 264–272.
- Reuter-Lorenz, P. A., & Lustig, C. (2005). Brain aging: reorganizing discoveries about the aging mind. *Current opinion in neurobiology*, *15*(2), 245–251.
- Ridderinkhof, K. R., Ullsperger, M., Crone, E. A., & Nieuwenhuis, S. (2004). The role of the medial frontal cortex in cognitive control. *Science*, *306*(5695), 443–447.
- Santesso, D. L., Segalowitz, S. J., & Schmidt, L. A. (2005). ERP correlates of error monitoring in 10-year olds are related to socialization. *Biological Psychology*, *70*(2), 79–87.
- Sarter, M., Givens, B., & Bruno, J. P. (2001). The cognitive neuroscience of sustained attention: where top-down meets bottom-up. *Brain research reviews*, *35*(2), 146–160.
- Sarter, M., & Paolone, G. (2011). Deficits in attentional control: cholinergic mechanisms and circuitry-based treatment approaches. *Behavioral neuroscience*, *125*(6), 825–835.
- Schreiber, M., Pietschmann, M., Kathmann, N., & Endrass, T. (2011). ERP correlates of performance monitoring in elderly. *Brain and cognition*, *76*(1), 131–139.
- Staub, B., Daignon-Camus, N., Bacon, E., & Bonnefond, A. (2014). Investigating sustained attention ability in the elderly by using two different approaches: Inhibiting ongoing behavior versus responding on rare occasions. *Acta psychologica*, *146*, 51–57.
- Thackray, R. I., & Touchstone, R. M. (1981). Age-related differences in complex monitoring performance (No. FAA-AM-81-12). FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION WASHINGTON DC OFFICE OF AVIATION MEDICINE.
- Tomprowski, P. D., & Tinsley, V. F. (1996). Effects of memory demand and motivation on sustained attention in young and older adults. *The American journal of psychology*, 187-204.

- Tops, M., Boksem, M. A., Wester, A. E., Lorist, M. M., & Meijman, T. F. (2006). Task engagement and the relationships between the error-related negativity, agreeableness, behavioral shame proneness and cortisol. *Psychoneuroendocrinology*, *31*(7), 847–858.
- Vallerand, R. J., O'Connor, B. P., & Hamel, M. (1995). Motivation in later life: Theory and assessment. *The International Journal of Aging and Human Development*, *41*(3), 221–238.
- Velanova, K., Lustig, C., Jacoby, L. L., & Buckner, R. L. (2007). Evidence for frontally mediated controlled processing differences in older adults. *Cerebral Cortex*, *17*, 1033–1046.
- van Boxtel, G. J., & Böcker, K. B. (2004). Cortical measures of anticipation. *Journal of Psychophysiology*, *18*(2-3), 61–76.
- Van Veen, V., & Carter, C. S. (2006). Error detection, correction, and prevention in the brain: a brief review of data and theories. *Clinical EEG and neuroscience*, *37*(4), 330–335.
- Vidal, F., Hasbroucq, T., Grapperon, J., & Bonnet, M. (2000). Is the 'error negativity' specific to errors? *Biological psychology*, *51*(2), 109–128.
- West, R. (2003). Neural correlates of cognitive control and conflict detection in the Stroop and digit-location tasks. *Neuropsychologia*, *41*(8), 1122–1135.
- West, R. (2004). The effects of aging on controlled attention and conflict processing in the Stroop task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *16*(1), 103–113.
- West, R., & Alain, C. (2000a). Effects of task context and fluctuations of attention on neural activity supporting performance of the Stroop task. *Brain research*, *873*(1), 102–111.
- West, R., & Alain, C. (2000b). Age-related decline in inhibitory control contributes to the increased Stroop effect observed in older adults. *Psychophysiology*, *37*(2), 179–189.

- West, R., Bailey, K., Tiernan, B. N., Boonsuk, W., & Gilbert, S. (2012). The temporal dynamics of medial and lateral frontal neural activity related to proactive cognitive control. *Neuropsychologia, 50*(14), 3450–3460.
- West, R., Choi, P., & Travers, S. (2010). The influence of negative affect on the neural correlates of cognitive control. *International Journal of Psychophysiology, 76*(2), 107–117.
- West, R., Jakubek, K., Wymbs, N., Perry, M., & Moore, K. (2005). Neural correlates of conflict processing. *Experimental brain research, 167*(1), 38–48.
- West, R., & Moore, K. (2005). Adjustments of cognitive control in younger and older adults. *Cortex, 41*(4), 570–581.
- West, R., & Schwarb, H. (2006). The influence of aging and frontal function on the neural correlates of regulative and evaluative aspects of cognitive control. *Neuropsychology, 20*(4), 468–481.

QUATRIEME PARTIE: DISCUSSION

L'attention soutenue renvoie à la capacité à maintenir efficacement son activité cognitive sur une source de stimulation ou une tâche. Ce processus attentionnel étant une sorte d'attention basique, fondamentale et déterminante pour la bonne marche d'un grand nombre de fonctions cognitives (Parasuraman, Warm, & See, 1998), une connaissance précise des effets du vieillissement normal sur cette capacité paraît tout à fait essentielle. Pourtant, les données issues de la littérature ne permettaient pas de donner une réponse claire à la question de la préservation ou de la détérioration de cette capacité avec l'âge. Cette thèse avait donc pour objectif principal d'avancer dans la connaissance des effets du vieillissement normal sur les capacités d'attention soutenue. La revue de la littérature réalisée a mis en évidence des résultats contradictoires (détérioration, préservation voire même amélioration de cette capacité avec l'âge) qui pourraient être liés à l'existence de deux approches différentes tant d'un point de vue théorique que méthodologique (Staub et al., 2013). En effet, dans le cadre de la première approche, l'attention soutenue renvoie précisément au maintien d'un état de préparation pour détecter et répondre au long cours à certains changements survenant de façon imprévisible dans l'environnement (Mackworth, 1957). Elle est étudiée par le biais de tâches de détection, dans lesquelles le sujet doit répondre à l'apparition de stimuli cibles rares (tâches dites traditionnelles ou TFT). Dans la seconde approche, l'attention soutenue est définie comme la capacité à inhiber une réponse bien apprise à de rares occasions (Robertson et al., 1997). Elle est étudiée par le biais de tâches d'inhibition (de type Go/No-Go), dans lesquelles le sujet doit répondre à l'apparition de stimuli non-cibles fréquents, et ne pas répondre à l'apparition de stimuli cibles rares. La majorité des études utilisant une approche TFT ont mis en évidence une altération des capacités d'attention soutenue avec l'âge, tandis que celles utilisant une approche Go/No-Go ont mis en évidence des capacités préservées.

1. Effets différenciés de l'âge sur les capacités d'attention soutenue

Face à cette absence de consensus, le premier objectif de ce travail de recherche a donc été d'évaluer les effets du vieillissement normal sur les capacités d'attention soutenue

en utilisant les deux approches existantes (étude 1). L'expérimentation menée est à notre connaissance la première étude qui a évalué, dans une comparaison intra-sujets, les effets du vieillissement normal sur les capacités d'attention soutenue en utilisant deux tâches ne différant que du point de vue de la réponse à donner et en optant pour une analyse du décours temporel des performances. Concrètement, dans cette étude, des sujets jeunes et âgés ont réalisé une tâche de détection traditionnelle (TFT), dans laquelle ils devaient répondre à l'apparition des stimuli désignés comme cibles (stimuli rares), et ne pas répondre aux stimuli non-cibles, ainsi qu'une tâche d'inhibition (Go/No-Go), dans laquelle ils devaient cette fois répondre aux non-cibles (stimuli fréquents), et ne pas répondre à l'apparition des cibles. Ces deux tâches avaient une durée assez longue (30 minutes) afin de permettre l'évaluation des effets du vieillissement sur le décours temporel des performances d'attention soutenue.

Les résultats comportementaux obtenus ont permis de montrer que selon l'approche utilisée, les capacités d'attention soutenue des sujets âgés n'étaient pas les mêmes. En effet, l'analyse du décours temporel (découpage de la durée de la tâche en trois périodes égales) de nos indicateurs comportementaux nous a permis de mettre en évidence des effets différenciés de l'âge selon l'approche utilisée : une altération dans la tâche de détection (SART TFT), se traduisant par une baisse de vigilance, c'est-à-dire une augmentation des erreurs d'omissions au fil de la tâche, et à l'inverse une préservation de cette capacité dans la tâche d'inhibition (SART Go/No-Go), se traduisant par une diminution des erreurs d'inhibition au fil de la tâche. Pour le groupe de sujets jeunes, les résultats sont inverses : ils sont parvenus à maintenir des performances stables dans la tâche de détection, mais ont présenté une baisse de vigilance dans la tâche d'inhibition. En revanche, dans les deux tâches, le niveau global de vigilance (taux d'erreurs moyen) ne différait pas entre les jeunes et les âgés. Les effets différenciés de l'âge sur les capacités d'attention soutenue mis en évidence dans cette première étude comportementale reflètent les contradictions présentes dans la littérature. En effet, une revue détaillée des articles publiés dans ce domaine depuis 1962 permet de constater que la majorité des études évaluant les capacités d'attention soutenue des sujets âgés par le biais de tâches de détection conclue en une altération, soit totale (détérioration quel que soit l'indicateur utilisé), soit partielle (soit augmentation du

taux d'erreurs, soit augmentation du temps de réponse), alors que celles utilisant des tâches d'inhibition concluent plutôt en une préservation de ces capacités avec l'âge (Staub et al., 2013). Plusieurs interprétations peuvent être avancées pour expliquer ces résultats.

Dans un premier temps, si l'on se penche sur les études mettant en évidence une altération des capacités d'attention soutenue dans le cadre du vieillissement, les difficultés perceptives inhérentes au vieillissement sont généralement mises en avant pour expliquer la détérioration des performances observée dans les tâches de détection (Baltes & Lindenberger, 1997 ; Schneider & Pichora-Fuller, 1999). En effet, dans ce type de tâche, dans la mesure où l'activation des processus attentionnels à l'apparition des stimuli cibles dépend de la saillance de ces stimuli, l'efficacité diminuée des processus perceptifs chez les seniors pourrait expliquer le déclenchement bottom-up altéré des processus attentionnels. Un autre facteur explicatif avancé, notamment lorsque les stimuli sont difficilement discriminables ou lorsqu'ils apparaissent à une fréquence élevée, est la baisse d'efficacité des processus de traitement de l'information, elle-même causée par une diminution des capacités de traitement avec l'âge (Kail & Salthouse, 1994 ; Salthouse, 1991). En d'autres termes, les capacités altérées des individus âgés dans ces tâches de détection pourraient être liées à une diminution des ressources attentionnelles inhérente au vieillissement normal (Bunce & Sisa, 2002 ; Craik & Byrd, 1982), ce qui est en parfait accord avec la théorie des ressources attentionnelles selon laquelle la baisse de vigilance résulterait d'une diminution progressive des ressources attentionnelles au fil de la tâche (Grier et al., 2003). Néanmoins, dans le cadre de notre étude, ces derniers éléments d'interprétation semblent plus difficilement invocables. En effet, dans notre tâche de détection (SART TFT), aucune difficulté particulière inhérente à la fréquence ou à la discriminabilité des stimuli par exemple, n'existe. Il semble par conséquent plus probable que la baisse de vigilance mise en évidence chez les sujets âgés dans la tâche de détection soit à mettre en lien avec l'absence de stimuli suffisamment éveillants pour activer de façon bottom-up les processus attentionnels chez les sujets âgés (Sarter et al., 2001).

Si l'on se penche maintenant du côté des études mettant en évidence une préservation des capacités d'attention soutenue dans le cadre du vieillissement, les éléments d'interprétation avancés pour tenter d'expliquer les bonnes performances des seniors dans les tâches d'inhibition vont tous dans le sens d'un contrôle attentionnel augmenté. En effet, on observe tout d'abord l'utilisation d'une stratégie privilégiant la précision à la rapidité chez les sujets âgés. Dans notre étude et dans d'autres, on constate en effet une augmentation du temps de réponse au fil de la tâche chez les sujets âgés uniquement, suggérant l'adoption d'une stratégie de réponse plus prudente au fur et à mesure de l'avancée de la tâche (Hertzog, Vernon, & Rympha, 1993 ; Salthouse, 1979 ; Smith & Brewer, 1995). Cette stratégie, mise en évidence dans plusieurs études, a été interprétée comme un engagement plus important du contrôle cognitif chez les individus âgés (Endrass et al., 2012b ; Falkenstein et al., 2001 ; Hoffmann & Falkenstein, 2011). Notre résultat indiquant la présence d'un ralentissement post-erreur uniquement chez le groupe âgé vient encore renforcer cette interprétation. En effet, ce ralentissement post-erreur, souvent plus marqué chez les individus âgés (Band & Kok, 2000 ; Jackson & Balota, 2012), est généralement interprété comme l'indice d'un contrôle attentionnel augmenté suite à une erreur (Gehring & Fencsik, 2001 ; Ridderinkhof et al., 2004). Cette interprétation est en parfait accord avec les études d'imagerie mettant en évidence une activation plus importante chez les individus âgés de certaines régions cérébrales sous-tendant précisément les mécanismes de contrôle cognitif (le cortex cingulaire antérieur et l'aire motrice pré-supplémentaire) (Hester et al., 2004 ; Nielson et al., 2002). Pris ensemble, ces résultats reflétant un engagement plus important du contrôle cognitif apportent des arguments en faveur de la théorie de l'automatisation, selon laquelle les erreurs d'attention seraient précisément causées par des défaillances des mécanismes de contrôle (Robertson et al., 1997). Soulignons enfin que l'interprétation de nos données en termes de mobilisation plus importante des mécanismes de contrôle cognitif chez les seniors est renforcée par les évaluations subjectives de la motivation faites avant le début de la passation expérimentale. En effet, les scores obtenus au questionnaire de motivation étaient significativement plus élevés chez les seniors comparativement aux jeunes : les sujets âgés se déclaraient plus motivés que les jeunes à la perspective de réaliser la tâche. Dans la mesure où la motivation

joue un rôle central dans la capacité d'un individu à déployer un effort attentionnel pour maintenir un bon niveau de performances tout au long d'une tâche (Sarter et al., 2006 ; Tomporowski & Tinsley, 1996), cette forte motivation chez les seniors peut contribuer à expliquer leurs bonnes performances. Plusieurs études suggèrent, en effet, que l'intérêt et la motivation dont font preuve les individus âgés, même dans des tâches cognitives très ennuyeuses, ont un impact positif sur leur niveau de performances (Forstmeier & Maercker, 2008 ; Hess, Emery, & Neupert, 2012 ; Thackray & Touchstone, 1981 ; Vallerand, 1995). Il a été notamment suggéré que les sujets âgés seraient particulièrement sensibles à tout déclin de leurs capacités cognitives, et investiraient ainsi plus d'effort pour maintenir un bon niveau de performances dans les tâches cognitives (Tomporowski & Tinsley, 1996). Cette mobilisation attentionnelle accrue se traduirait également par une meilleure capacité des sujets âgés à inhiber les pensées non liées à la tâche au long de sa réalisation (Jackson & Balota, 2012).

Pour finir, soulignons que les résultats comportementaux obtenus dans nos deux dernières études (études 3 et 4) avec une autre tâche d'inhibition (EAT), dans laquelle était donnée une consigne de précision uniquement, mettent également en évidence une préservation des capacités d'attention soutenue dans le cadre du vieillissement. Dans ces deux études, les mêmes effets comportementaux et subjectifs ont été retrouvés : une stabilité des performances au fil de la tâche chez les sujets âgés mais une baisse de vigilance chez les sujets jeunes, ainsi qu'un niveau de motivation plus élevé et un vagabondage d'esprit moins important chez les seniors. En plus de confirmer la préservation des capacités d'attention soutenue dans le cadre du vieillissement dans les tâches d'inhibition, ces études nous permettent également de montrer que la seule stratégie visant à privilégier la précision à la rapidité ne suffit pas à expliquer la bonne préservation des capacités d'attention soutenue chez les seniors. En effet, dans ces deux études, nous avons pu observer soit un maintien (étude 3) soit une accélération (étude 4) de la vitesse de réponse chez les sujets âgés.

II. Spécificités des sujets âgés dans l'engagement des processus automatiques et contrôlés

Pour aller plus loin dans l'interprétation des effets différenciés de l'âge sur les capacités d'attention soutenue selon l'approche utilisée, nous avons examiné dans un second temps le déroulement temporel des processus automatiques et contrôlés dans chacune des deux approches et pour chacun de nos groupes d'âge (objectif 2). En effet, dans la mesure notamment où ces processus ne sont pas sollicités de la même manière lorsqu'il s'agit de détecter des cibles rares ou d'inhiber un comportement en cours, leur examen paraît essentiel. Si la bonne réalisation des tâches de détection traditionnelles (TFT) va principalement reposer sur l'activation de processus bottom-up (la perception du stimulus cible suffisant à elle seule à déclencher de façon quasi automatique la réponse demandée au sujet), celle des tâches d'inhibition (Go/No-Go) va nécessiter l'activation de processus plus top-down et notamment, à l'apparition du stimulus cible, celle des mécanismes de contrôle attentionnel permettant l'inhibition de la réponse bien apprise (Manly et al., 1999). L'objectif central de ce travail (étude 2) était donc d'examiner, en comparant ces deux tâches, les spécificités liées à l'âge dans l'engagement des processus automatiques et contrôlés au fil de la réalisation de la tâche. Dans cette perspective, nous nous sommes appuyés sur des mesures électrophysiologiques de potentiels évoqués. Nous avons plus spécifiquement examiné le composant P3, dans la mesure où cette positivité constitue un indicateur du contrôle attentionnel mobilisé : son amplitude est réduite et sa latence raccourcie lorsque la réalisation de la tâche devient automatique, alors que son amplitude est augmentée et sa latence retardée dans le cas d'une mobilisation attentionnelle accrue (Hoffman et al., 1983 ; Kok, 2001 ; Romero & Polich, 1995).

Les résultats obtenus à l'issue de cette deuxième étude permettent d'apporter des arguments supplémentaires à l'interprétation avancée précédemment d'une mobilisation plus importante du contrôle attentionnel chez les seniors. En effet, ces résultats montrent que l'utilisation des processus automatiques et contrôlés dans chaque tâche différait entre les deux groupes d'âge, notamment du point de vue de leur recrutement au fil de la tâche.

Ils montrent que les sujets âgés ont eu recours à un mode de traitement contrôlé et ce quelle que soit le type de tâche, alors que les sujets jeunes ont adopté un mode de traitement automatique. Plus précisément, les données ERP mettent en évidence chez les seniors un engagement accru des processus de contrôle au fil du temps dans la tâche de détection (augmentation de la latence de la P3), et une activation maintenue de ces processus contrôlés dans la tâche d'inhibition (stabilité de l'amplitude de la P3). A l'inverse, les résultats mettent en évidence une automatisation des traitements chez les sujets jeunes dans la tâche de détection (réduction de la latence de la P3) et dans la tâche d'inhibition (réduction de l'amplitude de la P3). Cette tendance globale des sujets âgés à recourir à un mode de traitement plus contrôlé a déjà été mise en évidence dans certaines études (Daffner et al., 2005 ; Madden, Whiting, Provenzale, & Huettel, 2004 ; Madden, Spaniol, Bucur, & Whiting, 2007 ; Riis et al., 2008), et interprétée comme une activation compensatoire des processus contrôlés en raison de l'efficacité réduite des traitements sensoriels avec l'âge (Baltes & Linderberger, 1997 ; Madden, 2007 ; Reuter-Lorenz & Park, 2010). L'engagement accru des processus de contrôle chez les sujets âgés a cependant eu des effets différents sur les performances dans l'une et l'autre approche. Dans la tâche de détection (SART TFT), cette approche plus contrôlée pourrait avoir été adoptée par les seniors afin de compenser des déficits perceptifs empêchant l'activation des processus bottom-up à l'apparition des cibles. Le maintien de ce contrôle compensatoire semble cependant avoir été trop consommateur en ressources attentionnelles, ayant par conséquent un effet négatif sur les performances. A l'inverse, dans la tâche d'inhibition (SART Go/No-Go), le maintien d'un niveau élevé de contrôle attentionnel a permis aux sujets âgés de maintenir voire d'améliorer leurs performances au fil de la tâche.

III. Spécificités des sujets âgés dans l'activation des mécanismes de contrôle attentionnel

A la suite de ces études, et afin de mieux comprendre les capacités préservées des seniors mises en évidence dans les tâches d'inhibition, un troisième objectif a été d'étudier

les effets du vieillissement normal sur les différents mécanismes de contrôle attentionnel sous-tendant les capacités d'attention soutenue. Nous avons pour cela utilisé une tâche plus longue et plus difficile (études 3 et 4), nous permettant d'examiner plus précisément les spécificités des sujets âgés dans l'activation des différents mécanismes de contrôle cognitif. La tâche utilisée était une tâche d'inhibition (EAT), demandant aux sujets de répondre à l'apparition de stimuli non-cibles fréquents (essais non-critiques), et de ne pas répondre à l'apparition de stimuli cibles rares (essais critiques). En complément à ces deux études, certaines données issues de l'étude 2 ont également servi à examiner ces spécificités, dans la mesure où les deux tâches utilisées (SART TFT et SART Go/No-Go) permettent aussi de fournir des informations précises sur les différents mécanismes de contrôle auxquels nous nous sommes intéressés. Les résultats électrophysiologiques obtenus dans nos différentes études (2, 3 et 4) nous permettent d'apporter des arguments en faveur d'un engagement accru du contrôle cognitif en situation d'attention soutenue chez les âgés. Ce fonctionnement plus contrôlé se reflète à travers plusieurs spécificités des seniors dans l'activation des différents mécanismes de contrôle sollicités en situation d'attention soutenue (i.e. mécanismes de contrôle proactif, réactif consécutif au stimulus, réactif consécutif à la réponse). Ces spécificités sont les suivantes : (1) une activation globalement plus importante des mécanismes de contrôle, (2) un traitement attentionnel peu différencié entre les stimuli cibles et non-cibles, (3) une activation maintenue ou augmentée des mécanismes de contrôle au fil de la tâche, (4) une topographie plus frontale des régions sous-tendant ces mécanismes.

1. Activation globalement plus importante des mécanismes de contrôle

Plusieurs de nos résultats montrent d'abord que globalement, c'est-à-dire sur l'ensemble de la durée de la tâche, certains mécanismes de contrôle attentionnel sont recrutés de façon plus importante chez les individus âgés comparativement aux jeunes (effets simples de l'âge). Il s'agit notamment des mécanismes de contrôle réactif recrutés

après le stimulus et qui reflètent l'allocation attentionnelle, et ceux recrutés après la réponse et qui sont notamment associés au monitoring (évaluation) de l'erreur. Les indicateurs ERP nous ayant permis de mettre en évidence ces résultats sont la P2 (sur les stimuli cibles et non-cibles) et la P3 (sur les stimuli non-cibles), tous deux des indicateurs électrophysiologiques associés à l'allocation attentionnelle, ainsi que l'ERN, un indicateur du monitoring de l'erreur.

S'agissant des mécanismes de contrôle recrutés suite à l'apparition des stimuli, nous avons pu mettre en évidence une mobilisation attentionnelle globalement plus élevée chez les individus âgés (études 2 et 3). En effet, dans ces deux études, les amplitudes des composants P2 et P3 sont plus importantes chez les seniors que chez les jeunes. Ces deux composants évoqués par la présentation du stimulus sont tous deux associés à la quantité de ressources attentionnelles allouée au traitement du stimulus (Novak et al., 1992 ; Wickens et al., 1983). Ces résultats sont en accord avec d'autres études montrant également une amplitude plus large de la P2 chez des participants âgés (Amenedo & Diaz, 1998, 1999 ; Anderer et al., 1996 ; Getzmann et al., 2013). Ce résultat obtenu avec des tâches auditives a été interprété comme l'indicateur d'un besoin accru en ressources attentionnelles pour atteindre un bon niveau de performances chez les seniors (Getzmann et al., 2013). De la même façon, les effets mis en évidence sur la P3 (amplitude plus large chez les seniors de la P3 sur les stimuli non-critiques) ont déjà été décrits dans la littérature (Daffner et al., 2005 ; Riis et al., 2008). Dans les tâches d'oddball utilisées dans ces études, la P3 est typiquement très ample sur les stimuli oddball (stimuli critiques peu fréquents) et sur les stimuli nouveaux (stimuli non-pertinents peu fréquents) et réduite sur les stimuli standards (stimuli non-critiques fréquents). Or les auteurs ont observé que si les sujets jeunes et les âgés ne se distinguaient pas sur les stimuli critiques, les âgés présentaient en revanche une P3 plus large sur les stimuli standards (non-critiques). Ces résultats suggèrent que la quantité plus importante de ressources attentionnelles mobilisée par les seniors n'est pas limitée au traitement d'un type de stimulus particulier (lié par exemple à sa nature critique), mais reflète plutôt la façon dont les individus âgés appréhendent la tâche de manière générale (Riis et al., 2008). Soulignons toutefois que les effets mis en évidence dans notre étude sur ces deux composants positifs (P2 et P3) sont difficilement compatibles avec l'une des

théories du vieillissement, celle des ressources attentionnelles (Craik & Byrd, 1982). Selon cette théorie, en effet, le vieillissement s'accompagne d'une réduction des ressources attentionnelles envisagée comme le facteur explicatif des déficits présentés par les individus âgés dans diverses fonctions cognitives. Cette apparente contradiction pourrait notamment s'expliquer par la moyenne d'âge relativement peu élevée de nos seniors, ainsi que par la difficulté relative de notre tâche.

Concernant les mécanismes de contrôle recrutés après la réponse et notamment ceux consécutifs à une erreur, les résultats de l'étude 4 mettent en évidence une activation plus importante de ces processus chez les sujets âgés comparativement aux sujets jeunes, se traduisant par une amplitude de l'ERN plus large dans ce groupe d'âge. Ce corrélat électrophysiologique de l'erreur est généralement interprété comme ayant un rôle de signal permettant la mise en place d'ajustements compensatoires (Ridderinkhof et al., 2004). Cette idée est appuyée par des résultats montrant qu'une amplitude plus large de l'ERN est associée à un ralentissement post-erreur plus important (Debener et al., 2005 ; Gehring et al., 1993), un indicateur comportemental de l'augmentation du contrôle attentionnel suite à une erreur (Gehring & Fencsik, 2001). En accord avec cette interprétation, l'amplitude augmentée de l'ERN chez les seniors a été observée de façon concomitante à un bon maintien des performances au fil de la tâche, suggérant que ce composant évoqué par l'erreur a été le signal efficace d'un besoin accru en contrôle attentionnel visant à freiner une baisse de vigilance. Cette interprétation est renforcée par les analyses corrélationnelles montrant qu'une amplitude plus large de l'ERN était associée à un taux d'erreurs plus faible chez les sujets âgés. Enfin, cette négativité a aussi été mise en lien avec le poids que représente l'erreur pour un individu en fonction de sa motivation à réussir la tâche (van Veen & Carter, 2006b). Par exemple, dans une étude où l'on annonçait aux sujets que leurs performances seraient évaluées par un chercheur et comparées à celles des autres participants, l'amplitude de l'ERN chez ces sujets était plus large que dans une condition non-évaluée (Hajcak, Moser, Yeung, & Simons, 2005), suggérant un lien entre l'engagement du sujet dans la tâche et l'amplitude de ce composant (Santesso, Segalowitz, & Schmidt, 2005 ; Tops, Boksem, Wester, Lorist, & Meijman, 2006). Nos résultats vont bien dans le sens de cette interprétation, dans la mesure où les sujets âgés étaient effectivement plus motivés

que les jeunes pour réaliser la tâche. Soulignons cependant que les résultats obtenus dans la présente étude sont en contradiction avec ceux issus de la littérature, ayant plutôt décrits une ERN soit diminuée chez les individus âgés comparativement aux jeunes (Band & Kok, 2000 ; Endrass et al., 2012b ; Falkenstein et al., 2001 ; Hoffmann & Falkenstein, 2011 ; Mathewson et al. 2005 ; Nieuwenhuis et al. 2002 ; Schreiber et al., 2011), soit d'amplitude comparable entre les deux groupes (Eppinger et al., 2008 ; Pietschmann et al., 2008, 2011). Ces études font donc plutôt état d'une détérioration des processus de monitoring de l'erreur au cours du vieillissement, qui est le plus souvent mise en lien avec l'altération inhérente à l'âge du système dopaminergique mésencéphalique, dans lequel serait générée l'activité reflétée par l'ERN (Holroyd & Coles, 2002 ; Nieuwenhuis et al., 2002).

Cependant, certaines de ces études ont aussi montré que si l'amplitude de l'ERN était réduite chez les seniors, ceux-ci présentaient à l'inverse une négativité liée à la réponse correcte (CRN) plus large que celles des jeunes (Endrass et al., 2012 ; Schreiber et al., 2011). Ces résultats ont été interprétés comme l'indicateur d'une stratégie plus contrôlée adoptée par les âgés par laquelle les processus de monitoring de la réponse sont activés de la même façon quelle que soit la réponse donnée (correcte ou erronée) (Schreiber et al., 2011). Dans notre étude, les résultats montrant une amplitude de la CRN comparable entre jeunes et âgés mais une amplitude plus large de l'ERN chez les âgés pourrait suggérer que cette stratégie plus contrôlée chez les seniors ne s'est non pas traduite par un engagement moins différencié des processus de monitoring (c'est-à-dire indépendant du type de réponse), mais par un engagement plus important de ces processus suite à une erreur. Soulignons aussi que la consigne donnée aux sujets de privilégier la précision plutôt que la rapidité pourrait avoir facilité la capacité des individus âgés à activer de façon accrue ces mécanismes de contrôle consécutifs à l'erreur. En effet, une étude a montré que lorsque les sujets âgés devaient privilégier la rapidité plutôt que la précision, leur capacité à recruter de façon plus importante ces mécanismes de contrôle après une erreur était réduite (reflétée par une diminution de l'amplitude de l'ERN) (Endrass et al., 2012).

2. Traitement attentionnel peu différencié entre les stimuli cibles et non-cibles

D'autres résultats électrophysiologiques vont dans le sens d'un engagement accru des mécanismes de contrôle cognitif chez les seniors. Il s'agit de ceux mettant en évidence un traitement attentionnel indifférencié entre stimuli cibles et non-cibles (interactions âge x type de stimulus). Nos résultats montrent en effet que parmi les mécanismes de contrôle réactif consécutifs au stimulus, ceux reflétant les processus de détection du conflit étaient activés chez les âgés indépendamment du type de stimulus (critique ou non-critique). Plus précisément, les résultats issus de l'étude 2 (tâche d'inhibition SART Go/No-Go) indiquent chez les sujets âgés une N2 d'amplitude identique pour les stimuli conflictuels (essais No-Go) et non-conflictuels (essais Go). Le composant N2 est typiquement plus large après la présentation d'un stimulus conflictuel (perceptif ou moteur) comparativement à un stimulus non-conflictuel, et a donc été interprété comme le signal de la détection d'un conflit (van Veen & Carter, 2002 ; Yeung et al., 2004). C'est d'ailleurs cet effet qui a été retrouvé chez les jeunes dans notre étude. Les résultats obtenus chez les âgés pourraient suggérer que le conflit existant entre deux représentations de réponse (exécution et suppression) était présent pour tous les essais chez ce groupe, et ainsi être interprété comme l'indicateur d'une altération de ces processus avec l'âge (West & Alain, 2000b). Cependant, à la lumière des résultats comportementaux montrant que les sujets âgés ont été capables de maintenir de bonnes performances tout au long de la tâche (taux d'erreurs stable), une autre interprétation peut être avancée. En effet, ce résultat montrant une N2 équivalente sur les stimuli conflictuels (cibles) et non-conflictuels (non-cibles) pourrait être la conséquence de l'activation de processus contrôlés dès les premières étapes d'évaluation du stimulus, résultant en un conflit diminué à l'apparition de stimuli conflictuels et permettant par conséquent une résolution plus efficace de ce conflit (suppression de la réponse) (Lucci et al., 2013).

3. Activation maintenue ou augmentée des mécanismes de contrôle au fil de la tâche

Une autre spécificité des sujets âgés mise en évidence dans nos études concerne l'évolution au fil de la tâche de l'activité des mécanismes de contrôle (interactions âge x période). En effet, l'analyse du décours temporel (découpage de la durée de la tâche en trois périodes égales) des indicateurs ERP nous a permis de montrer un effet différencié de la durée de la tâche sur les mécanismes de contrôle proactif et réactif en fonction de l'âge. Nos résultats montrent plus précisément un maintien stable ou accru de l'engagement du contrôle proactif (maintien de l'objectif) et réactif consécutif au stimulus (traitement du conflit) chez les individus âgés.

Nous avons tout d'abord mis en évidence un meilleur maintien du contrôle proactif chez les sujets âgés (étude 4). En effet, les résultats montrent une stabilité de l'amplitude de la pre-stimulus slow wave dans ce groupe, tandis qu'une diminution de l'amplitude de ce composant a été observée chez les jeunes. Ce composant étant associé au maintien de la représentation du contexte (autrement dit des objectifs) de la tâche (West, 2004 ; West & Schwarb, 2006), nos résultats suggèrent une meilleure capacité chez les individus âgés à maintenir l'objectif en mémoire de travail tout au long de la tâche. Par ailleurs, cet effet différencié de l'âge sur les indicateurs électrophysiologiques est parallèle à celui observé sur les indicateurs comportementaux : un niveau de performances et un engagement du contrôle proactif stables chez les âgés, et au contraire une baisse de vigilance et une réduction du contrôle proactif chez les jeunes. Ce lien existant entre niveau performance et contrôle proactif est renforcé par les analyses de corrélation montrant qu'une amplitude élevée de la slow wave était associée à un taux d'erreurs faible, cette corrélation étant en outre plus élevée dans le groupe de sujets âgés. Pris ensemble, ces résultats suggèrent donc que les bonnes performances d'attention soutenue chez les sujets âgés pourraient notamment s'expliquer par leur capacité à maintenir actifs ces mécanismes de contrôle proactif au fil du temps. Quelques études ont à l'inverse observé une amplitude réduite de la pre-stimulus slow wave chez les individus âgés (West, 2004 ; West & Schwarb, 2006). Ces résultats ont été interprétés comme une efficacité réduite des mécanismes permettant le

maintien du contexte, en accord avec les données issues d'études d'imagerie (Jimura & Braver, 2010 ; Paxton et al., 2008 ; Velanova et al., 2007). La contradiction apparente amenée par nos résultats pourrait s'expliquer par le niveau de complexité inférieur de notre tâche comparativement aux tâches utilisées dans ces études, moins demandeuse pour les sujets âgés en termes de ressources nécessaires au bon maintien de l'objectif. Cependant, il est important de souligner que notre tâche d'inhibition présentait tout de même une certaine difficulté, liée à la nécessité de maintenir actifs ces mécanismes de contrôle proactif (très consommateurs en ressources attentionnelles) pendant une durée prolongée. Or, dans le cas présent, nos résultats montrent que seuls les individus âgés ont réussi à maintenir ce contrôle tout au long de la tâche, ceci pouvant en partie s'expliquer par leur plus forte motivation à rester engagé dans la tâche.

De plus, nous avons également montré des spécificités liées à l'âge concernant l'évolution au fil de la tâche des processus du traitement du conflit, tant dans les étapes précoces (détection du conflit) que tardives (résolution du conflit) (études 3 et 4).

Nos résultats mettent tout d'abord en évidence une meilleure efficacité des processus de détection de conflit en fin de tâche chez les sujets âgés, reflétée par la latence plus précoce de la N2 dans ce groupe comparativement aux jeunes en fin de tâche (étude 3). En effet, cette négativité est typiquement interprétée comme le corrélant électrophysiologique de la détection d'un conflit, et il a été suggéré que dans les tâches d'inhibition, sa latence d'apparition lors des essais conflictuels (demandant une inhibition de la réponse) serait un indicateur particulièrement fiable d'une inhibition réussie (Roche, Garavan, Fowe, & O'Mara, 2005). Par exemple, il a été montré que les sujets qui commettaient le moins d'erreurs d'inhibition présentaient une latence plus réduite de la N2 sur les stimuli conflictuels comparativement aux sujets qui commettaient le plus d'erreurs (Falkenstein et al., 1999). Dans notre étude, la latence plus réduite de cette négativité en fin de tâche chez les seniors pourrait donc refléter une meilleure efficacité des processus de détection du conflit, facilitant l'étape suivante de résolution (inhibition de la réponse) et permettant par conséquent le maintien d'un taux d'erreurs faible. Les données de l'étude 4 ont aussi montré une diminution de l'amplitude de la MFN au fil de la tâche uniquement

chez les sujets âgés. Ce composant étant de la même façon associé à la détection du conflit, ces résultats suggèrent que l'ampleur du conflit existant entre les deux représentations de réponse (répondre *versus* inhiber) a progressivement diminué au fil de la tâche chez les seniors, peut-être en raison d'une meilleure adaptation au conflit. En effet, des études ont montré que la MFN avait une amplitude réduite à l'apparition d'un stimulus conflictuel lorsque l'essai précédent était lui aussi conflictuel (plutôt que non-conflictuel), suggérant que ce composant est sensible à l'habituation au conflit (West, Bailey, Tiernan, Boonsuk, & Gilbert, 2012). L'adaptation progressive au conflit mise en évidence chez les sujets âgés pourrait donc expliquer leur meilleure capacité à résoudre ce conflit (i.e. inhiber la réponse), reflétée par la stabilité du taux d'erreurs d'inhibition dans ce groupe. De façon générale, ces résultats montrant une spécificité des seniors dans l'évolution au fil de la tâche des processus de détection du conflit (augmentation de leur efficacité et habituation) peuvent donc aussi être interprétés comme l'indicateur d'un contrôle réactif consécutif au stimulus augmenté chez ces individus.

Nos résultats montrent également une activation plus importante au fil de la tâche des processus de résolution du conflit (inhibition de la réponse), reflétée par une augmentation au fil de la tâche de l'amplitude de la P3 sur les stimuli conflictuels (étude 3). Soulignons que des résultats semblables ont été observés dans l'étude 4 sur le sustained potential (SP), un composant analogue à la P3 d'un point de vue fonctionnel, et pouvant donc faire l'objet des mêmes interprétations. Ce composant, qui apparaît après la N2 (associé à la détection du conflit), et qui est également plus ample après la présentation de stimuli conflictuels comparativement à des stimuli non-conflictuels, a été interprété comme l'indicateur de la résolution du conflit (inhibition de la réponse dans une tâche d'inhibition). Si une majorité d'études a plutôt mis en évidence une réduction au cours du vieillissement de l'amplitude de la P3 évoquée par les stimuli conflictuels (Lucci et al., 2013 ; Picton et al., 1984 ; Tachibana et al., 1996), quelques études récentes ont également observé une augmentation de son amplitude chez les seniors (Vallesi et al., 2009 ; Vallesi, 2011 ; Vallesi & Stuss, 2010). Cet effet, qui a également été mis en évidence dans des tâches d'inhibition, a été interprété comme une difficulté plus importante pour les individus âgés à inhiber une réponse sur-apprise et fortement activée. En effet, des résultats ont montré que sur les

essais conflictuels, l'amplitude de la P3 (associée à la mobilisation attentionnelle) était corrélée positivement avec l'amplitude du lateralized readiness potential (associé à la préparation motrice) chez les sujets âgés, suggérant un besoin accru en ressources attentionnelles pour réussir à stopper la réponse initiée (Vallesi & Stuss, 2010). Selon cette interprétation, nos résultats suggèrent que les sujets âgés avaient de plus en plus de difficultés à inhiber leurs réponses lors des essais critiques au fil de la tâche, nécessitant le recrutement de ressources attentionnelles supplémentaires pour réussir à stopper ces réponses. Par ailleurs, à la lumière des résultats comportementaux montrant un niveau de performances stable tout au long de la tâche chez les individus âgés, ce recrutement compensatoire de mécanismes de contrôle attentionnel pourrait être interprété comme le reflet d'un effort attentionnel déployé par ces sujets pour freiner une baisse de vigilance (Sarter et al., 2006).

4. Topographie plus frontale des régions sous-tendant les mécanismes de contrôle

Enfin, nous avons également pu mettre en évidence (étude 3) une spécificité des sujets âgés quant aux régions cérébrales qui sous-tendent l'activation des mécanismes de contrôle réactif consécutifs au stimulus (résolution du conflit). En effet, l'amplitude de la P3 sur les stimuli conflictuels (essais No-Go) était plus ample chez les sujets âgés que chez les jeunes au niveau frontal, alors qu'aucune différence d'amplitude entre les deux groupes n'a été observée au niveau des autres régions du scalp (interactions âge x électrode). Cette « antériorisation » des processus de résolution du conflit a déjà observée dans plusieurs études (Fallgatter et al., 1999 ; Friedman et al., 1997 ; Lucci et al., 2013). La suractivation des régions frontales au cours du vieillissement a généralement interprétée comme l'activation de mécanismes compensatoires visant à pallier la détérioration des traitements opérés dans les régions plus postérieures (Lucci et al., 2013 ; O'Connell et al., 2012 ; Reuter-Lorenz & Park, 2010). La mise en évidence chez les individus âgés d'une suractivation des zones frontales (également activées par les jeunes) et/ou du recrutement de régions frontales

supplémentaires apparaît cependant paradoxale : si d'un côté l'atrophie corticale se produisant au cours du vieillissement touche particulièrement les régions frontales (Raz, 2008), ce sont cependant dans ces mêmes régions que les patterns d'activation compensatoire sont le plus souvent observés (Reuter-Lorenz & Cappell, 2008). En effet, dans la plupart des études montrant une suractivation des régions frontales chez les sujets âgés, elle s'accompagne de performances équivalentes entre jeunes et âgés, et est donc supposée refléter l'activité de mécanismes compensatoires sans lesquels les performances se détérioreraient (Cabeza, Anderson, Locantore, & McIntosh, 2002 ; Reuter-Lorenz & Lustig, 2005). Dans notre étude, l'activité accrue des processus de contrôle mise en évidence par cette suractivation frontale pourrait donc être compensatoire. Selon cette interprétation, le recrutement plus important des régions frontales chez les individus âgés a pu contribuer à leur réussite en termes d'inhibition, se traduisant par le maintien d'un bon niveau de performances au fil de la tâche. Cette interprétation est renforcée par les résultats montrant que ce sont les individus âgés ayant fait le moins d'erreurs qui présentaient cette activation frontale augmentée comparativement aux jeunes, appariés sur le niveau de performance.

Soulignons enfin que cette frontalisation a également été observée au niveau du traitement des stimuli non-conflictuels (étude 3). En effet, l'amplitude de la P3 sur ces stimuli (essais Go) était plus large chez les sujets âgés comparativement aux jeunes non seulement dans les régions pariétales (compatible avec la localisation typiquement pariétale de la P3 dans sa fonction d'indicateur de la mobilisation attentionnelle) mais aussi dans les régions frontales. Ces résultats montrent donc que le traitement attentionnel des stimuli non-conflictuels était associé à l'activation d'une quantité plus importante de régions cérébrales (notamment frontales) chez les sujets âgés, et pouvant être interprétés comme l'indice d'une mobilisation des processus de contrôle globalement plus importante chez les seniors.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail de thèse était d'avancer dans la connaissance des effets du vieillissement normal sur les capacités d'attention soutenue. Pour cela, nous avons combiné l'utilisation de mesures comportementales, subjectives, et de potentiels évoqués. Nous avons dans un premier temps retrouvé les résultats contradictoires déjà mis en évidence dans la littérature concernant les capacités d'attention soutenue des individus âgés, et montré que ces contradictions étaient liées à l'approche utilisée pour les évaluer. En effet, nos résultats mettent en évidence une détérioration de leurs capacités à détecter des stimuli cibles rares (approche traditionnelle), mais une préservation de leurs capacités à inhiber un comportement en cours à de rares occasions (approche plus récente). Si ces deux approches permettent l'une et l'autre d'évaluer les capacités d'attention soutenue des individus, elles reposent en revanche sur l'activation de processus différents : processus bottom-up pour les tâches de détection, et processus plus top-down pour les tâches d'inhibition, pouvant expliquer ces effets différenciés de l'âge sur les capacités d'attention soutenue. Dans cette perspective, l'étude des mécanismes cognitifs et neuronaux qui les sous-tendent nous ont permis d'y apporter des éléments d'explication. En effet, nous avons montré que les individus âgés engageaient de façon accrue les processus contrôlés en situation d'attention soutenue et ce indépendamment de la nature de la tâche. Ce fonctionnement plus contrôlé se reflète à travers plusieurs spécificités des seniors dans l'activation des différents mécanismes de contrôle attentionnel sollicités en situation d'attention soutenue (i.e. mécanismes de contrôle proactif, réactif consécutif au stimulus, réactif consécutif à la réponse) : une activation globalement plus importante de ces mécanismes, un traitement attentionnel peu différencié entre les stimuli cibles et non-cibles, une activation maintenue ou augmentée de ces mécanismes au fil de la tâche, et une topographie plus frontale des régions sous-tendant ces mécanismes. Ces spécificités, qui vont avoir des répercussions positives sur les performances des seniors en situation d'attention soutenue dans des tâches d'inhibition, ont notamment été mises en lien avec leur niveau de motivation plus élevé, leur permettant de fournir un effort suffisamment important pour rester engagé dans ces tâches longues et monotones.

La question de l'efficacité à plus long terme de cette stratégie contrôlée adoptée par les participants âgés reste ouverte. En effet, dans la mesure où cette stratégie est

particulièrement coûteuse en ressources attentionnelles, elle pourrait être difficile à maintenir sur une durée plus longue ou dans des tâches plus complexes. S'agissant des capacités d'attention soutenue des sujets jeunes, il serait également intéressant d'examiner dans quelle mesure la manipulation de leur niveau de motivation pourrait avoir un effet bénéfique sur leurs capacités d'attention soutenue. A l'issue de ce travail, il nous semble important par ailleurs de souligner la moyenne d'âge relativement peu élevée de nos participants (environ 65 ans), dans la mesure où elle pourrait en partie contribuer à expliquer l'existence de certaines contradictions avec les données de la littérature sur le vieillissement normal. Une approche life-span, incluant des groupes d'âge différents (individus d'âge moyen et individus très âgés), nous permettrait certainement d'aller plus loin dans la connaissance des effets du vieillissement normal sur les capacités d'attention soutenue et les mécanismes de contrôle qui les sous-tendent.

Par ailleurs, si les tâches utilisées dans le cadre de ce travail de thèse sont idéales pour mettre en évidence les spécificités des mécanismes qui sous-tendent les capacités d'attention soutenue, elles sont limitées quant aux possibilités d'étude des interactions entre ressources attentionnelles, mode de contrôle proactif et mode de contrôle réactif. En effet, ces deux modes de contrôle diffèrent du point de vue de leurs dynamiques temporelles et donc du point de vue de la quantité de ressources attentionnelles mobilisées : le mode proactif, engagé avant la survenue d'évènements critiques, est bien plus demandeur en ressources attentionnelles que ne l'est le mode réactif, qui n'est engagé qu'après leur survenue. Si l'utilisation conjointe de ces deux modes de contrôle semble nécessaire au maintien de bonnes performances d'attention soutenue, aucune étude ne s'est spécifiquement penchée sur la façon dont ces deux modes de contrôle interagissent au fil de la réalisation d'une tâche longue, ni si des spécificités existent dans ce domaine pour les sujets âgés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akerstedt, T. (1988). Sleepiness as a consequence of shift work. *Sleep, 11*, 17–34.
- Amenedo, E., & Diaz, F. (1998). Aging-related changes in processing of non-target and target stimuli during an auditory oddball task. *Biological Psychology, 48*(3), 235–267.
- Amenedo, E., & Díaz, F. (1999). Ageing-related changes in the processing of attended and unattended standard stimuli. *Neuroreport, 10*(11), 2383–2388.
- Anderer, P., Semlitsch, H. V., & Saletu, B. (1996). Multichannel auditory event-related brain potentials: effects of normal aging on the scalp distribution of N1, P2, N2 and P300 latencies and amplitudes. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 99*, 458–472.
- Aron, A. R. (2011). From reactive to proactive and selective control: developing a richer model for stopping inappropriate responses. *Biological Psychiatry, 69*, e55–68.
- Aron, A. R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2004). Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends in cognitive sciences, 8*(4), 170–177.
- Baltes, P. B., & Lindenberger, U. (1997). Emergence of a powerful connection between sensory and cognitive functions across the adult life span: a new window to the study of cognitive aging?. *Psychology and aging, 12*(1), 12–21.
- Band, G. P., & Kok, A. (2000). Age effects on response monitoring in a mental-rotation task. *Biological Psychology, 51*(2-3), 201–221.
- Berardi, A. M., Parasuraman, R., & Haxby, J. V. (2001). Overall vigilance and sustained attention decrements in healthy aging. *Experimental Aging Research, 27*(1), 19–39.
- Berardi, A. M., Parasuraman, R., & Haxby, J. V. (2005). Sustained attention in mild Alzheimer's disease. *Developmental Neuropsychology, 28*(1), 507–537.
- Berchicci, M., Lucci, G., Pesce, C., Spinelli, D., & Di Russo, F. (2012). Prefrontal hyperactivity in older people during motor planning. *Neuroimage, 62*(3), 1750–1760.
- Boksem, M. A., Meijman, T. F., & Lorist, M. M. (2006). Mental fatigue, motivation and action monitoring. *Biological psychology, 72*(2), 123–132.
- Bokura, H., Yamaguchi, S., Matsubara, M., & Kobayashi, S. (2002). Frontal lobe contribution to response inhibition process—an ERP study and aging effect. *International Congress Series, 1232*, 17–20.
- Bonnefond, A., Doignon-Camus, N., Hoeft, A., & Dufour, A. (2011). Impact of motivation on cognitive control in the context of vigilance lowering: An ERP study. *Brain and cognition, 77*(3), 464–471.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological review, 108*, 624–652.
- Brache, K., Scialfa, C., & Hudson, C. (2010). Aging and vigilance: who has the inhibition deficit?. *Experimental Aging Research, 36*(2), 140–152.

- Braver, T. S. (2012). The variable nature of cognitive control: a dual mechanisms framework. *Trends in cognitive sciences*, 16(2), 106–113.
- Braver, T. S., & Barch, D. M. (2002). A theory of cognitive control, aging cognition, and neuromodulation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 26, 809–817.
- Braver, T. S., Cohen, J. D., Nystrom, L. E., Jonides, J., Smith, E. E., & Noll, D. C. (1997). A parametric study of prefrontal cortex involvement in human working memory. *Neuroimage*, 5(1), 49–62.
- Braver, T. B., Gray, J. G., & Burgess, G. B. (2007). Explaining the many varieties of working memory variation: Dual mechanisms of cognitive control. In A. R. A. Conway, C. Jarrold, M. J. Kane, A. Miyake, & J.N. Towse (Eds.), *Variation in Working Memory*. Oxford: Oxford University Press.
- Braver, T. S., Paxton, J. L., Locke, H. S., & Barch, D. M. (2009). Flexible neural mechanisms of cognitive control within human prefrontal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(18), 7351–7356.
- Braver, T. A., & West, R. (2008). Working memory, executive control, and aging. In F.I.M. Craik, & T. A. Salthouse (Eds.), *The Handbook of Cognition and Aging, 3rd Ed.* New York: Psychology Press.
- Brébion, G. (2001). Language processing, slowing, and speed/accuracy trade-off in the elderly. *Experimental Aging Research*, 27, 137–150.
- Brewer, N., & Smith, G. A. (1984). How normal and retarded individuals monitor and regulate speed and accuracy of responding in serial choice tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, 113(1), 71–93.
- Broadbent, D. E., Cooper, P. F., Fitzgerald, P., & Parkes, K. R. (1982). The cognitive failures questionnaire (CFQ) and its correlates. *British Journal of Clinical Psychology*, 21(1), 1–16.
- Brunia, C. H. M., & Vingerhoets, A. J. J. M. (1980). CNV and EMG preceding a plantar flexion of the foot. *Biological psychology*, 11(3), 181–191.
- Bunce, D. (2001). Age differences in vigilance as a function of health-related physical fitness and task demands. *Neuropsychologia*, 39(8), 787–797.
- Bunce, D., & Sisa, L. (2002). Age differences in perceived workload across a short vigil. *Ergonomics*, 45(13), 949–960.
- Cabeza, R., Anderson, N. D., Locantore, J. K., & McIntosh, A. R. (2002). Aging gracefully: compensatory brain activity in high-performing older adults. *Neuroimage*, 17, 1394–1402.
- Cabeza, R., Locantore, J., & Anderson, N. (2003). Lateralization of prefrontal activity during episodic memory retrieval: evidence for the production-monitoring hypothesis. *Cognitive Neuroscience, Journal of*, 15(2), 249–259.

- Carriere, J. S., Cheyne, J. A., Solman, G. J., & Smilek, D. (2010). Age trends for failures of sustained attention. *Psychology and aging, 25*(3), 569–574.
- Carter, C. S., Botvinick, M. M., & Cohen, J. D. (1999). The contribution of the anterior cingulate cortex to executive processes in cognition. *Reviews in the Neurosciences, 10*, 49–57.
- Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D., & Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science, 280*, 747–749.
- Carter, L., Russell, P. N., & Helton, W. S. (2013). Target predictability, sustained attention, and response inhibition. *Brain and Cognition 82*(1), 35–42.
- Chambers, C., Bellgrove, M., Stokes, M., Henderson, T., Garavan, H., Robertson, I., ... & Mattingley, J. (2006). Executive “brake failure” following deactivation of human frontal lobe. *Cognitive Neuroscience, Journal of, 18*(3), 444–455.
- Cheyne, J. A., Carriere, J. S. A., & Smilek, D. (2006). Absent-mindedness: Lapses in conscious awareness and everyday cognitive failures. *Consciousness and Cognition, 15*, 578–592.
- Cohen, R. M., Semple, W. E., Gross, M., King, A. C., & Nordahl, T. E. (1992). Metabolic brain pattern of sustained auditory discrimination. *Experimental Brain Research, 92*(1), 165–172.
- Coles, M. G. H., & Rugg, M. D. (1995). Event-related brain potentials: An introduction. In: M. D. Rugg, & Coles, M. G. (Eds.), *Electrophysiology of mind: Event-related brain potentials and cognition*. New York: Oxford University Press.
- Coull, J. T. (1998). Neural correlates of attention and arousal: insights from electrophysiology, functional neuroimaging and psychopharmacology. *Progress in neurobiology, 55*(4), 343–361.
- Coull, J. T., Frackowiak, R. S. J., & Frith, C. D. (1998). Monitoring for target objects: activation of right frontal and parietal cortices with increasing time on task. *Neuropsychologia, 36*(12), 1325–1334.
- Craik, F. I. M., & Byrd, M. (1982). Aging and cognitive deficits: the role of attentional resources. In: F. I. M. Craik, & S. Trehub. (Eds.), *Aging and cognitive processes*. New York: Plenum Press.
- Craik, F. I. M., & Salthouse, T.A. (2008). *Handbook of cognitive aging, third ed.* New York: Psychology Press.
- Czernochowski, D., Nessler, D., & Friedman, D. (2010). On why not to rush older adults—relying on reactive cognitive control can effectively reduce errors at the expense of slowed responses. *Psychophysiology, 47*(4), 637–646.
- Czigler, I., Csibra, G., & Ambro, A. (1996). Aging, stimulus identification and the effect of probability: An event-related potential study. *Biological Psychology, 43*(1), 27–40.
- Daniel, R. S. (1967). Alpha and theta EEC in vigilance. *Perceptual and Motor Skills, 25*(3), 697–703.

- Danielmeier, C., & Ullsperger, M. (2011). Post-error adjustments. *Frontiers in psychology, 2*, 233.
- Daffner, K. R., Ryan, K. K., Williams, D. M., Budson, A. E., Rentz, D. M., Scinto, L. F., & Holcomb, P. J. (2005). Age-related differences in novelty and target processing among cognitively high performing adults. *Neurobiology of aging, 26*(9), 1283–1295.
- Datta, A., Cusack, R., Hawkins, K., Heutink, J., Rorden, C., Robertson, I. H., & Manly, T. (2008). The P300 as a marker of waning attention and error propensity. *Computational intelligence and neuroscience, 2007*.
- Davies, A. D. M., & Davies, D. R. (1975). The effects of noise and time of day upon age differences in performance at two checking tasks. *Ergonomics, 18*(3), 321–336.
- Davies, D. R., & Griew, S. (1963). A further note on the effect of aging on auditory vigilance performance: the effect of low signal frequency. *Journal of Gerontology, 18*, 370–371.
- Davies, D.R., & Parasuraman, R. (1982). *The psychology of vigilance*. London, New York: Academic Press.
- Davis, S. W., Dennis, N. A., Daselaar, S. M., Fleck, M. S., & Cabeza, R. (2008). Que PASA? The posterior–anterior shift in aging. *Cerebral cortex, 18*(5), 1201–1209.
- Dawson, G. D. (1954). A summation technique for the detection of small evoked potentials. *Electroencephalography and clinical neurophysiology, 6*, 65–84.
- Deaton, J. E., & Parasuraman, R. (1993). Sensory and cognitive vigilance: Effects of age on performance and subjective workload. *Human Performance, 6*, 71–97.
- Debener, S., Ullsperger, M., Siegel, M., Fiehler, K., Von Cramon, D. Y., & Engel, A. K. (2005). Trial-by-trial coupling of concurrent electroencephalogram and functional magnetic resonance imaging identifies the dynamics of performance monitoring. *Journal of Neuroscience, 25*, 11730–11737.
- Dockree, P. M., Bellgrove, M. A., O'Keefe, F. M., Moloney, P., Aimola, L., Carton, S., & Robertson, I. H. (2006). Sustained attention in traumatic brain injury (TBI) and healthy controls: enhanced sensitivity with dual-task load. *Experimental Aging Research, 168*(1–2), 218–229.
- Dockree, P. M., Kelly, S. P., Robertson, I. H., Reilly, R. B., & Foxe, J. J. (2005). Neurophysiological markers of alert responding during goal-directed behavior: a high-density electrical mapping study. *Neuroimage, 27*(3), 587–601.
- Dockree, P.M., Kelly, S.P., Roche, R.A., Hogan, M.J., Reilly, R.B., & Robertson, I.H. (2004). Behavioural and physiological impairments of sustained attention after traumatic brain injury. *Cognitive Brain Research, 20*, 403–414.
- Donchin, E., & Coles, M. G. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating?. *Behavioral and brain sciences, 11*(03), 357–374.

- Donkers F. C. L., & van Boxtel, G. J. M. (2004) The N2 in go/no-go task reflects conflict monitoring not response inhibition. *Brain and Cognition*, *56*, 165–176.
- Eichele, H., Juvodden, H. T., Ullsperger, M., & Eichele, T. (2010). Mal-adaptation of event-related EEG responses preceding performance errors. *Frontiers in human neuroscience*, *4*, 65.
- Endrass, T., Klawohn, J., Gruetzmann, R., Ischebeck, M., & Kathmann, N. (2012a). Response-related negativities following correct and incorrect responses: Evidence from a temporospatial principal component analysis. *Psychophysiology*.
- Endrass, T., Schreiber, M., & Kathmann, N. (2012b). Speeding up older adults: Age-effects on error processing in speed and accuracy conditions. *Biological Psychiatry*, *89*, 426–432.
- Eppinger, B., Kray, J., Mock, B., & Mecklinger, A. (2008). Better or worse than expected?. Aging, learning, and the ERN. *Neuropsychologia*, *46*(2), 521–539.
- Eysenck, M. W. (1982). *Attention and arousal: cognition and performance*. New York: Springer-Verlag.
- Fabiani, M., & Friedman, D. (1995). Changes in brain activity patterns in aging: the novelty oddball. *Psychophysiology*, *32*(6), 579–594.
- Fabiani, M., Friedman, D., & Cheng, J. C. (1998). Individual differences in P3 scalp distribution in older adults, and their relationship to frontal lobe function. *Psychophysiology*, *35*(06), 698–708.
- Fabiani, M., Low, K. A., Wee, E., Sable, J. J., & Gratton, G. (2006). Reduced suppression or labile memory? Mechanisms of inefficient filtering of irrelevant information in older adults. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*, 637–650.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1990). Effects of errors in choice reaction tasks on the ERP under focused and divided attention. In: C. H. M. Brunia, A. W. K. Gaillard, & A. Kok. (Eds.), *Psychophysiological Brain Research*. Tilburg, the Netherlands: Tilburg University Press.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1991). Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, *78*(6), 447–455.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., & Hohnsbein, J. (1999). ERP components in go/nogo tasks and their relation to inhibition. *Acta Psychologica*, *101*, 267–291.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., & Hohnsbein, J. (2001). Changes of error-related ERPs with age. *Experimental Brain Research*, *138*(2), 258–262.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., & Hohnsbein, J. (2002). Inhibition-related ERP components: Variation with modality, age, and time-on-task. *Journal of Psychophysiology*, *16*, 167–175.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., Christ, S., & Hohnsbein, J. (2000). ERP components on reaction errors and their functional significance: a tutorial. *Biological psychology*, *51*(2), 87–107.

- Falkenstein, M., Koshlykova, N. A., Kiroj, V. N., Hoormann, J., & Hohnsbein, J. (1995). Late ERP components in visual and auditory Go/No-Go tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *96*, 36–43.
- Fallgatter, A. J., Mueller, T. J., & Strik, W. K. (1999). Age-related changes in the brain electrical correlates of response control. *Clinical Neurophysiology*, *110*(5), 833–838.
- Faulkner, T. W. (1962). Variability of performance in a vigilance task. *Journal of Applied Psychology*, *46*(5), 325–328.
- Filley, C. M., & Cullum, C. M. (1994). Attention and vigilance functions in normal aging. *Applied neuropsychology*, *1*(1–2), 29–32.
- Fink, G. R., Halligan, P. W., Marshall, J. C., Frith, C. D., Frackowiak, R. S., & Dolan, R. J. (1997). Neural mechanisms involved in the processing of global and local aspects of hierarchically organized visual stimuli. *Brain*, *120*(10), 1779–1791.
- Finomore, V. S., Shaw, T. H., Warm, J. S., Matthews, G., Riley, M. A., Boles, D. B., & Weldon, D. (2008, September). Measuring the Workload of Sustained Attention: Further Evaluation of the Multiple Resources Questionnaire. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 52, No. 18, pp. 1209–1213). Sage Publications.
- Fisk, A. D., Rogers, W. A., & Giambra, L. M. (1990). Consistent and varied memory/visual search: Is there an interaction between age and response-set effects. *Journal of gerontology*, *45*(3), P81–P87.
- Fisk, A. D., & Schneider, W. (1981). Control and automatic processing during tasks requiring sustained attention: A new approach to vigilance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *23*(6), 737–750.
- Fjell, A. M., & Walhovd, K. B. (2001). P300 and neuropsychological tests as measures of aging: scalp topography and cognitive changes. *Brain Topography*, *14*(1), 25–40.
- Folk, C. L., & Hoyer, W. J. (1992). Aging and shifts of visual spatial attention. *Psychology and aging*, *7*(3), 453–465.
- Folstein, J. R., & Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: a review. *Psychophysiology*, *45*(1), 152–170.
- Ford, J. M. (1999). Schizophrenia: the broken P300 and beyond. *Psychophysiology*, *36*(6), 667–682.
- Ford, J. M., Roth, W. T., Isaacks, B. G., Tinklenberg, J. R., Yesavage, J., & Pfefferbaum, A. (1997). Automatic and effortful processing in aging and dementia: event-related brain potentials. *Neurobiology of aging*, *18*(2), 169–180.
- Ford, J. M., Roth, W. T., Isaacks, B. G., White, P. M., Hood, S. H., & Pfefferbaum, A. (1995). Elderly men and women are less responsive to startling noises: N1, P3 and blink evidence. *Biological psychology*, *39*(2), 57–80.

- Forster, S., Elizalde, A. O. N., Castle, E., & Bishop, S. J. (2013). Unraveling the Anxious Mind: Anxiety, Worry, and Frontal Engagement in Sustained Attention Versus Off-Task Processing. *Cerebral Cortex*, bht248.
- Forstmeier, S., & Maercker, A. (2008). Motivational reserve: lifetime motivational abilities contribute to cognitive and emotional health in old age. *Psychology and aging*, 23(4), 886–899.
- Friedman, D., Kazmerski, V., & Fabiani, M. (1997). An overview of age-related changes in the scalp distribution of P3b. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 104(6), 498–513.
- 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.
- Frith, C. D., Friston, K. J., Liddle, P. F., & Frackowiak, R. S. J. (1991). Willed action and the prefrontal cortex in man: a study with PET. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 244(1311), 241–246.
- Gajewski, P. D., Stoerig, P., & Falkenstein, M. (2008). ERP correlates of response selection in a response conflict paradigm. *Brain Research*, 1189, 127–134.
- Garcia-Larrea, L., Lukaszewicz, A. C., & Mauguiere, F. (1992). Revisiting the oddball paradigm. Non-target vs. neutral stimuli and the evaluation of ERP attentional effects. *Neuropsychologia* 30(8), 723–741.
- 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, 1298–1300.
- Gehring, W. J., & Fencsik, D. E. (2001). Functions of the medial frontal cortex in the processing of conflict and errors. *The Journal of Neuroscience*, 21(23), 9430–9437.
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological science*, 4(6), 385–390.
- Gehring, W. J., & Knight, R. T. (2000). Prefrontal–cingulate interactions in action monitoring. *Nature neuroscience*, 3(5), 516–520.
- Getzmann, S., Gajewski, P. D., & Falkenstein, M. (2013). Does age increase auditory distraction? Electrophysiological correlates of high and low performance in seniors. *Neurobiology of aging*, 34(8), 1952–1962.
- Giambra, L. M. (1989). Task-unrelated-thought frequency as a function of age: a laboratory study. *Psychology and aging*, 4(2), 136–143.
- Giambra, L. M. (1995). A laboratory method for investigating influences on switching attention to task-unrelated imagery and thought. *Consciousness and cognition*, 4(1), 1–21.
- Giambra, L. M. (1997). Sustained attention and aging: Overcoming the decrement?. *Experimental aging research*, 23(2), 145–161.

- Giambra, L. M., Camp, C. J., & Grodsky, A. (1992). Curiosity and stimulation seeking across the adult life span: Cross-sectional and 6-to 8-year longitudinal findings. *Psychology and aging, 7*(1), 150–157.
- Giambra, L. M., & Quilter, R. E. (1988). Sustained attention in adulthood: A unique, large-sample, longitudinal and multicohort analysis using the Mackworth Clock-Test. *Psychology and aging, 3*(1), 75–83.
- Glisky, E.L. (2007). Changes in cognitive function in human aging. In D. R. Riddle (Ed.), *Brain aging: models, methods and mechanisms* (pp. 1–15). New York: CRC Press.
- Gmehlin, D., Kreisel, S. H., Bachmann, S., Weisbrod, M., & Thomas, C. (2011). Age effects on preattentive and early attentive auditory processing of redundant stimuli: is sensory gating affected by physiological aging?. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences, 66*(10), 1043–1053.
- Grady, C. L. (2008). Cognitive neuroscience of aging. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1124*(1), 127–144.
- Grady, C. L., Bernstein, L. J., Beig, S., & Siegenthaler, A. L. (2002). The effects of encoding task on age-related differences in the functional neuroanatomy of face memory. *Psychology and aging, 17*(1), 7–23.
- Grandjean, J., & Collette, F. (2011). Influence of response prepotency strength, general working memory resources, and specific working memory load on the ability to inhibit predominant responses: A comparison of young and elderly participants. *Brain and cognition, 77*(2), 237–247.
- Gratton, G., Coles, M. G., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 55*, 468–484.
- Greenwood, P. M., Parasuraman, R., & Haxby, J. V. (1993). Changes in visuospatial attention over the adult lifespan. *Neuropsychologia, 31*(5), 471–485.
- Gridley, M. C., Mack, J. L., & Gilmore, G. C. (1986). Age effects on a nonverbal auditory sustained attention task. *Perceptual and motor skills, 62*(3), 911–917.
- Grier, R. A., Warm, J. S., Dember, W. N., Matthews, G., Galinsky, T. L., Szalma, J. L., & Parasuraman, R. (2003). The vigilance decrement reflects limitations in effortful attention, not mindlessness. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 45*(3), 349–359.
- Griew, S., & Davies, D. R. (1962). The effect of aging on auditory vigilance performance. *Journal of gerontology, 17*(1), 88–90.
- Grodsky, A., & Giambra, L.M. (1990–1991). The consistency across vigilance and reading tasks of individual differences in the occurrence of task-unrelated and task-related images and thoughts. *Imagination, Cognition and Personality, 10*, 39–52.

- Gutchess, A., Welsh, R., Hedden, T., Bangert, A., Minear, M., Liu, L., & Park, D. (2005). Aging and the neural correlates of successful picture encoding: frontal activations compensate for decreased medial-temporal activity. *Cognitive Neuroscience, Journal of*, *17*(1), 84–96.
- Hajcak, G., McDonald, N., & Simons, R. F. (2003). To err is autonomic: Error-related brain potentials, ANS activity, and post-error compensatory behavior. *Psychophysiology*, *40*(6), 895–903.
- Hajcak, G., Moser, J. S., Yeung, N., & Simons, R. F. (2005). On the ERN and the significance of errors. *Psychophysiology*, *42*(2), 151–160.
- Hämmerer, D., Li, S. C., Muller, V., & Lindenberger, U. (2010). An electrophysiological study of response conflict processing across the lifespan: Assessing the roles of conflict monitoring, cue utilization, response anticipation, and response suppression. *Neuropsychologia*, *48*, 3305–3316.
- Harkins, S. W., Nowlin, J. B., Ramm, D., & Schroeder, S. (1974). Effects of age, sex, and time-on-watch on a brief continuous performance task. In E.B. Palmore (Ed.), *Normal aging II; reports from the Duke longitudinal studies, 1970-1973*. Durham, N.C.: Duke University Press.
- Harnishfeger, K. K. (1995). The development of cognitive inhibition: Theories, definitions, and research evidence. In F. N. Dempster, & C. J. Brainerd (Eds.), *Interference and inhibition in cognition*. San Diego: Academic Press.
- Harnishfeger, K. K., & Bjorklund, D. F. (1993). The ontogeny of inhibition mechanisms: a renewed approach to cognitive development. In M. L. Howe, & R. Pasnak (Eds.), *Emerging themes in cognitive development*. New York: Springer-Verlag.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of experimental and theoretical research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Human Mental Workload*. Amsterdam: North Holland.
- Hasher, L., & Zacks, R. T. (1979). Automatic and effortful processes in memory. *Journal of experimental psychology: General*, *108*(3), 356–388.
- 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, Vol. 22* (pp. 193–225). New York: Academic Press.
- Hasher, L., Zacks, R. T., & May, C. P. (1999). Inhibitory control, circadian arousal, and age. In: D. Gopher & A. Koriati (Eds.), *Attention and Performance XVII, Cognitive Regulation of Performance: Interaction of Theory and Application* (pp. 653–675). Cambridge, MA: MIT Press.
- Hedden, T., & Gabrieli, J. D. E. (2004). Insights into the ageing mind: A view from cognitive neuroscience. *Nature Reviews Neuroscience*, *5*, 87–96.
- Helton, W. S. (2009). Impulsive responding and the sustained attention to response task. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *31*(1), 39–47.

- Helton, W. S., Hollander, T. D., Warm, J. S., Matthews, G., Dember, W. N., Wallaart, M., ... & Hancock, P. A. (2005). Signal regularity and the mindlessness model of vigilance. *British Journal of Psychology*, *96*(2), 249–261.
- Helton, W. S., Kern, R. P., & Walker, D. R. (2009). Conscious thought and the sustained attention to response task. *Consciousness and cognition*, *18*(3), 600–607.
- Helton, W. S., & Russell, P. N. (2010). Feature absence-presence and two theories of lapses of sustained attention. *Psychological Research*, *75*(5), 384–392.
- Helton, W. S., & Russell, P. N. (2011). Working memory load and the vigilance decrement. *Experimental Brain Research*, *212*(3), 429–437.
- Helton, W.S., Shaw, T.H., Warm, J.S., Matthews, G., Dember, W.N., & Hancock, P.A. (2004). Workload transitions: Effects on vigilance performance, and stress. In D. A. Vincenzi, M. Mouloua, & P. A. Hancock (Eds.), *Human performance, situation awareness and automation current research and trends*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Helton, W. S., & Warm, J. S. (2008). Signal salience and the mindlessness theory of vigilance. *Acta psychologica*, *129*(1), 18–25.
- Hertzog, C., Vernon, M. C., & Rypma, B. (1993). Age differences in mental rotation task performance: The influence of speed/accuracy tradeoffs. *Journal of Gerontology*, *48*(3), P150–P156.
- Hess, T. M., Emery, L., & Neupert, S. D. (2012). Longitudinal relationships between resources, motivation, and functioning. *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, *67*(3), 299–308.
- Hester, R., Fassbender, C., & Garavan, H. (2004). Individual differences in error processing: a review and reanalysis of three event-related fMRI studies using the GO/NOGO task. *Cerebral Cortex*, *14*(9), 986–994.
- Hester, R., Foxe, J. J., Molholm, S., Shpaner, M., & Garavan, H. (2005). Neural mechanisms involved in error processing: a comparison of errors made with and without awareness. *Neuroimage*, *27*(3), 602–608.
- Heuninckx, S., Wenderoth, N., & Swinnen, S. P. (2008). Systems neuroplasticity in the aging brain: recruiting additional neural resources for successful motor performance in elderly persons. *Journal of Neuroscience*, *28*, 91–99.
- Hillyard, S. A., & Anllo-Vento, L. (1998). Event-related brain potentials in the study of visual selective attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *95*, 781–787.
- Himmelheber, A. M., Sarter, M., & Bruno, J. P. (2000). Increases in cortical acetylcholine release during sustained attention performance in rats. *Cognitive Brain Research*, *9*(3), 313–325.
- Hitchcock, E. M., Dember, W. N., Warm, J. S., Moroney, B. W., & See, J. E. (1999). Effects of cueing and knowledge of results on workload and boredom in sustained attention. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *41*(3), 365–372.

- Hitchcock, E. M., Warm, J. S., Matthews, G., Dember, W. N., Shear, P. K., Tripp, L. D., ... & Parasuraman, R. (2003). Automation cueing modulates cerebral blood flow and vigilance in a simulated air traffic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 4(1–2), 89–112.
- Hoffman, J. E., Simons, R. F., & Houck, M. R. (1983). Event-Related Potentials During Controlled and Automatic Target Detection. *Psychophysiology*, 20(6), 625–632.
- Hoffmann, S., & Falkenstein, M. (2011). Aging and error processing: age related increase in the variability of the error-negativity is not accompanied by increase in response variability. *PLoS One*, 6(2), e17482.
- Holroyd, C. B., & Coles, M. G. (2002). The neural basis of human error processing: reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychological review*, 109(4), 679–709.
- Iragui, V. J., Kutas, M., Mitchiner, M. R., & Hillyard, S. A. (1993). Effects of aging on event-related brain potentials and reaction times in an auditory oddball task. *Psychophysiology*, 30(1), 10–22.
- Isreal, J. B., Chesney, G. L., Wickens, C. D., & Donchin, E. (1980). P300 and tracking difficulty: Evidence for multiple resources in dual-task performance. *Psychophysiology*, 17, 259–273.
- Jackson, J. D., & Balota, D. A. (2012). Mind-wandering in younger and older adults: Converging evidence from the sustained attention to response task and reading for comprehension. *Psychology and aging*, 27(1), 106–119.
- Jennings, J. M., & Jacoby, L. L. (1993). Automatic versus intentional uses of memory: aging, attention, and control. *Psychology and aging*, 8(2), 283–293.
- Jennings, J. M., Dagenbach, D., Engle, C. M., & Funke, L. J. (2007). Age-related changes and the attention network task: an examination of alerting, orienting, and executive function. *Aging, Neuropsychology and Cognition*, 14(4), 353–369.
- Jimura, K., & Braver, T. S. (2010). Age-related shifts in brain activity dynamics during task switching. *Cerebral Cortex*, 20, 1420–1431.
- Jodo, E., & Kayama, Y. (1992). Relation of a negative ERP component to response inhibition in a Go/No-go task. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 82, 477–482.
- Johnson Jr., R. (1986). A triarchic model of P300 amplitude. *Psychophysiology*, 23, 367–384.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Kail, R., & Salthouse, T. A. (1994). Processing speed as a mental capacity. *Acta psychologica*, 86(2–3), 199–225.
- Kato, Y., Endo, H., & Kizuka, T. (2009). Mental fatigue and impaired response processes: event-related brain potentials in a Go/NoGo task. *International Journal of Psychophysiology*, 72(2), 204–211.

- Kerns, J. G., Cohen, J. D., MacDonald, A. W., Cho, R. Y., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2004). Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science*, *303*(5660), 1023–1026.
- King, J. A., Korb, F. M., Von Cramon, D. Y., & Ullsperger, M. (2010). Post-error behavioral adjustments are facilitated by activation and suppression of task-relevant and task-irrelevant information processing. *The Journal of neuroscience*, *30*(38), 12759–12769.
- Kok, A. (1986). Effects of degradation of visual stimulation on components of the event-related potential (ERP) in Go/NoGo reaction tasks. *Biological Psychology*, *23*, 21–38.
- Kok, A. (2000). Age-related changes in involuntary and voluntary attention as reflected in components of the event-related potential (ERP). *Biological psychology*, *54*(1), 107–143.
- Kok, A. (2001). On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology*, *38*, 557–77.
- Kopp, B., Lange, F., Howe, J., & Wessel, K. (2014). Age-related changes in neural recruitment for cognitive control. *Brain and cognition*, *85*, 209–219.
- Kramer, A. F., Humphrey, D. G., Larish, J. F., & Logan, G. D. (1994). Aging and inhibition: beyond a unitary view of inhibitory processing in attention. *Psychology and aging*, *9*(4), 491–512.
- Kramer, A. F., & Strayer, D. L. (1988). Assessing the development of automatic processing: an application of dual-task and event-related brain potential methodologies. *Biological psychology*, *26*(1), 231–267.
- Krawietz, S. A., Tamplin, A. K., & Radvansky, G. A. (2012). Aging and mind wandering during text comprehension. *Psychology and aging*, *27*(4), 951–958.
- Lim, J., & Dinges, D. F. (2008). Sleep deprivation and vigilant attention. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1129*(1), 305–322.
- Lindenberger, U., & Baltes, P. B. (1994). Sensory functioning and intelligence in old age: a strong connection. *Psychology and aging*, *9*(3), 339–355.
- Liotti, M., Woldorff, M. G., Perez III, R., & Mayberg, H. S. (2000). An ERP study of the temporal course of the Stroop color-word interference effect. *Neuropsychologia*, *38*(5), 701–711.
- Lorist, M. M., Boksem, M. A., & Ridderinkhof, K. R. (2005). Impaired cognitive control and reduced cingulate activity during mental fatigue. *Cognitive Brain Research*, *24*(2), 199–205.
- Lucci, G., Berchicci, M., Spinelli, D., Taddei, F., & Di Russo, F. (2013). The effects of aging on conflict detection. *PloS one*, *8*(2), e56566.
- Luck, S. J., & Hillyard, S. A. (1994). Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search. *Psychophysiology*, *31*, 291–308.
- MacDonald, A. W., Cohen, J. D., Stenger, V. A. & Carter, C. S. (2000). Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science*, *288*(5472), 1835–1838.

- Mackworth, N. H. (1957). Some factors affecting vigilance. *The Advancement of Science*, 53, 389–393.
- Mackworth, N. H. (1948). The breakdown of vigilance during prolonged visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1, 6–21.
- Madden, D.J. (2007). Aging and Visual Attention. *Current Directions in Psychological Science*, 16(2), 70–74.
- Madden, D. J., Spaniol, J., Bucur, B., & Whiting, W. L. (2007). Age-related increase in top-down activation of visual features. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 60(5), 644–651.
- Madden, D.J., & Whiting, W.L. (2003). Age-related changes in visual attention. *Advances in Cell Aging and Gerontology*, 15, 41–88.
- Madden, D.J., Whiting, W.L., & Huettel, S.A. (2005). Age-related changes in neural activity during visual perception and attention. In R. Cabeza, L. Nyberg, L., D. C. Park (Eds.), *Cognitive neuroscience of aging linking cognitive and cerebral aging*. Oxford; New York: Oxford University Press.
- Madden, D. J., Whiting, W. L., Provenzale, J. M., & Huettel, S. A. (2004). Age-related changes in neural activity during visual target detection measured by fMRI. *Cerebral Cortex*, 14(2), 143–155.
- Mahoney, J. R., Verghese, J., Goldin, Y., Lipton, R., & Holtzer, R. (2010). Alerting, orienting, and executive attention in older adults. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 16(05), 877–889.
- Makeig, S., & Inlow, M. (1993). Lapse in alertness: coherence of fluctuations in performance and EEG spectrum. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 86(1), 23–35.
- Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. (1990). Allocation of visual attention to spatial locations: Trade-off functions for event-related brain potentials and detection performance. *Perception and Psychophysics*, 47, 532–550.
- Mani, T. M., Bedwell, J. S., & Miller, L. S. (2005). Age-related decrements in performance on a brief continuous performance test. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 20(5), 575–586.
- Manly, T., Robertson, I. H., Galloway, M., & Hawkins, K. (1999). The absent mind: further investigations of sustained attention to response. *Neuropsychologia*, 37(6), 661–670.
- Manly, T., Heutink, J., Davison, B., Gaynord, B., Greenfield, E., Parr, A., ... & Robertson, I. H. (2004). An electronic knot in the handkerchief: “Content free cueing” and the maintenance of attentive control. *Neuropsychological Rehabilitation*, 14(1–2), 89–116.
- Marco-Pallarés, J., Camara, E., Münte, T. F., & Rodríguez-Fornells, A. (2008). Neural mechanisms underlying adaptive actions after slips. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(9), 1595–1610.
- Mathalon, D. H., Bennett, A., Askari, N., Gray, E. M., Rosenbloom, M. J., & Ford, J. M. (2003). Response-monitoring dysfunction in aging and Alzheimer's disease: an event-related potential study. *Neurobiology of Aging*, 24(5), 675–685.

- Mathewson, K. J., Dywan, J., & Segalowitz, S. J. (2005). Brain bases of error-related ERPs as influenced by age and task. *Biological Psychology, 70*(2), 88–104.
- Matsumoto, K., & Tanaka, K. (2004). Conflict and cognitive control. *Science, 303*(5660), 969–970.
- Matthews, G. (2000). *Human performance: cognition, stress, and individual differences*. Hove, East Sussex; Philadelphia, PA: Psychology Press; Taylor & Francis Group.
- Matthews, G., Joyner, L., Gilliland, K., Campbell, S. E., Falconer, S., & Huggins, J. (1999). Validation of a comprehensive stress state questionnaire: Towards a state 'Big Three'?. In I. Mervielde, I. J. Deary, F. De Fruyt, & F. Ostendorf (Eds.), *Personality psychology in Europe* (Vol. 7, pp. 335–350). Tilburg, the Netherlands: Tilburg University Press.
- McAvinue, L. P., Habekost, T., Johnson, K. A., Kyllingsbæk, S., Vangkilde, S., Bundesen, C., & Robertson, I. H. (2012). Sustained attention, attentional selectivity, and attentional capacity across the lifespan. *Attention, Perception, & Psychophysics, 74*(8), 1570–1582.
- McGaughy, J., Kaiser, T., & Sarter, M. (1996). Behavioral vigilance following infusions of 192 IgG-saporin into the basal forebrain: selectivity of the behavioral impairment and relation to cortical AChE-positive fiber density. *Behavioral neuroscience, 110*(2), 247.
- McVay, J. C., Meier, M. E., Touron, D. R., & Kane, M. J. (2013). Aging ebbs the flow of thought: adult age differences in mind wandering, executive control, and self-evaluation. *Acta psychologica, 142*(1), 136–147.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual review of neuroscience, 24*(1), 167–202.
- Mouloua, M., & Parasuraman, R. (1995). Aging and cognitive vigilance: Effects of spatial uncertainty and event rate. *Experimental aging research, 21*(1), 17–32.
- Muir, J. L., Everitt, B. J., & Robbins, T. W. (1994). AMPA-induced excitotoxic lesions of the basal forebrain: a significant role for the cortical cholinergic system in attentional function. *The Journal of neuroscience, 14*(4), 2313–2326.
- Nasman, V. T., & Rosenfeld, J. P. (1990). Parietal P3 response as an indicator of stimulus categorization: increased P3 amplitude to categorically deviant target and nontarget stimuli. *Psychophysiology, 27*(3), 338–350.
- Neal, G. L., & Pearson, R. G. (1966). Comparative effects of age, sex, and drugs upon two tasks of auditory vigilance. *Perceptual and motor skills, 23*(3), 967–974.
- Nebes, R. D., & Brady, C. B. (1993). Phasic and tonic alertness in Alzheimer's disease. *Cortex, 29*, 77–90.
- Nessler, D., Friedman, D., Johnson Jr, R., & Bersick, M. (2007). ERPs suggest that age affects cognitive control but not response conflict detection. *Neurobiology of Aging, 28*(11), 1769–1782.

- Nielson, K., Garavan, H., Langenecker, S. A., Stein, E. A., & Rao, S. M. (2001). Event-related fMRI of inhibitory control reveals lateralized prefrontal activation differences between healthy young and older adults. *Brain and Cognition*, *47*(1–2), 168–172.
- Nielson, K. A., Langenecker, S. A., & Garavan, H. (2002). Differences in the functional neuroanatomy of inhibitory control across the adult life span. *Psychology and aging*, *17*(1), 56–71.
- Nieuwenhuis, S., Ridderinkhof, K. R., Blom, J., Band, G. P., & Kok, A. (2001). Error-related brain potentials are differentially related to awareness of response errors: Evidence from an antisaccade task. *Psychophysiology*, *38*(5), 752–760.
- Nieuwenhuis, S., Ridderinkhof, K. R., Talsma, D., Coles, M. G., Holroyd, C. B., Kok, A., & Van der Molen, M. W. (2002). A computational account of altered error processing in older age: dopamine and the error-related negativity. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *2*(1), 19–36.
- Nieuwenhuis, S., Yeung, N., van den Wildenberg, W., & Ridderinkhof, K. R. (2003). Electrophysiological correlates of anterior cingulate function in a Go/NoGo task: Effects of response conflict and trial type frequency. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *3*, 17–26.
- 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: Vol. 4* (pp. 1–18). New York: Plenum.
- Notebaert, W., Houtman, F., Opstal, F. V., Gevers, W., Fias, W., & Verguts, T. (2009). Post-error slowing: an orienting account. *Cognition*, *111*(2), 275–279.
- Novak, G., Ritter, W., & Vaughan Jr, H. G. (1992). Mismatch detection and the latency of temporal judgements. *Psychophysiology*, *29*(4), 398–411.
- Nuechterlein, K. H., Parasuraman, R., & Jiang, Q. (1983). Visual sustained attention: Image degradation produces rapid sensitivity decrement over time. *Science*, *220*, 327–329.
- O'Connell, R. G., Balsters, J. H., Kilcullen, S. M., Campbell, W., Bokde, A. W., Lai, R., Upton, N., & Robertson, I. H. (2012). A simultaneous ERP/fMRI investigation of the P300 aging effect. *Neurobiology of aging*, *33*(10), 2448–2461.
- O'Connell, R. G., Bellgrove, M. A., Dockree, P., Lau, A., Fitzgerald, M., & Robertson, I. H. (2008). Self-Alert Training: volitional modulation of autonomic arousal improves sustained attention. *Neuropsychologia*, *46*(5), 1379–1390.
- O'Connell, R. G., Dockree, P. M., Bellgrove, M. A., Kelly, S. P., Hester, R., Garavan, H., ... & Foxe, J. J. (2007). The role of cingulate cortex in the detection of errors with and without awareness: a high-density electrical mapping study. *European Journal of Neuroscience*, *25*(8), 2571–2579.
- O'Connell, R. G., Dockree, P. M., Bellgrove, M. A., Turin, A., Ward, S., Foxe, J. J., & Robertson, I. H. (2009). Two types of action error: electrophysiological evidence for separable inhibitory and

- sustained attention neural mechanisms producing error on go/no-go tasks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(1), 93–104.
- Oken, B. S., Salinsky, M. C., & Elsas, S. M. (2006). Vigilance, alertness, or sustained attention: physiological basis and measurement. *Clinical Neurophysiology*, 117(9), 1885–1901.
- Overbeek, T. J., Nieuwenhuis, S., & Ridderinkhof, K. R. (2005). Dissociable components of error processing: On the functional significance of the Pe vis-à-vis the ERN/Ne. *Journal of Psychophysiology*, 19(4), 319–329.
- Parasuraman, R. (1986). Vigilance, monitoring, and search. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance Vol. II, Cognitive processes and performance* (pp. 43–1, 43–39). New York: Wiley.
- Parasuraman, R. (1998). *The attentive brain*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Parasuraman, R., & Giambra, L. (1991). Skill development in vigilance: effects of event rate and age. *Psychology and aging*, 6(2), 155–169.
- Parasuraman, R., & Haxby, J. V. (1993). Attention and brain function in Alzheimer's disease: A review. *Neuropsychology*, 7, 242–272.
- Parasuraman, R., Nestor, P., & Greenwood, P. (1989). Sustained-attention capacity in young and older adults. *Psychology and aging*, 4(3), 339–345.
- Parasuraman, R., Warm, J. S., & See, J. E. (1998). Brain systems of vigilance. In R. Parasuraman (Ed.), *The attentive brain* (pp. 221–256). Cambridge, MA: MIT Press.
- Pardo, J. V., Fox, P. T., & Raichle, M. E. (1991). Localization of a human system for sustained attention by positron emission tomography. *Nature*, 349(6304), 61–64.
- Park, D.C. (2000). The basic mechanisms accounting for age-related decline in cognitive function. In D. C. Park, & N. Schwarz (Eds.), *Cognitive aging: A primer* (pp. 3–21). New York: Psychology Press.
- Park, D.C., & Reuter-Lorenz, P. (2009). The adaptive brain: Aging and neurocognitive scaffolding. *Annual Review of Psychology*, 60, 173–196.
- Pattyn N, & Soetens E. (2004). Endogenous and exogenous attention in vigilance tasks. *Abstracts of the 46th Annual Meeting of the International Military Testing Association*; p.56.
- Paxton, J. L., Barch, D. M., Racine, C. A., & Braver, T. S. (2008). Cognitive control, goal maintenance, and prefrontal function in healthy aging. *Cerebral Cortex*, 18(5), 1010–1028.
- Paus, T., Zatorre, R., Hofle, N., Caramanos, Z., Gotman, J., Petrides, M., & Evans, A. (1997). Time-related changes in neural systems underlying attention and arousal during the performance of an auditory vigilance task. *Cognitive Neuroscience, Journal of*, 9(3), 392–408.
- Perry, R. J., & Hodges, J. R. (1999). Attention and executive deficits in Alzheimer's disease A critical review. *Brain*, 122(3), 383–404.

- Perry, R. J., Watson, P., & Hodges, J. R. (2000). The nature and staging of attention dysfunction in early (minimal and mild) Alzheimer's disease: relationship to episodic and semantic memory impairment. *Neuropsychologia*, *38*(3), 252–271.
- Pfefferbaum, A., & Ford, J. M. (1988). ERPs to stimuli requiring response production and inhibition: Effects of age, probability and visual noise. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *71*, 55–63.
- Pfefferbaum, A., Ford, J. M., Roth, W. T., & Kopell, B. S. (1980). Age-related changes in auditory event-related potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *49*(3), 266–276.
- Pfefferbaum, A., Ford, J. M., Weller, B. J., & Kopell, B. S. (1985). ERPs to response production and inhibition. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *60*, 423–434.
- Picton, T. W., Stuss, D. T., Champagne, R. F., & Nelson, R. F. (1984). The effects of age on human event-related potentials. *Psychophysiology*, *21*, 312–325.
- Pietschmann, M., Endrass, T., & Kathmann, N. (2011). Age-related alterations in performance monitoring during and after learning. *Neurobiology of aging*, *32*(7), 1320–1330.
- Pietschmann, M., Simon, K., Endrass, T., & Kathmann, N. (2008). Changes of performance monitoring with learning in older and younger adults. *Psychophysiology*, *45*(4), 559–568.
- Polich, J. (1987). Task difficulty, probability, and inter-stimulus interval as determinants of P300 from auditory stimuli. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, *68*(4), 311–320.
- Polich, J. (1996). Meta-analysis of P300 normative aging studies. *Psychophysiology*, *33*(4), 334–353.
- Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, *118*, 2128–2148.
- Polich, J., & Kok, A. (1995). Cognitive and biological determinants of P300: an integrative review. *Biological Psychology*, *41*, 103–146.
- Posner, M. I., & Bois, S. J. (1971). Components of attention. *Psychological Review*, *78*, 391–408.
- Posner, M.I., & Petersen, S.E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, *13*, 25–42.
- Potts, G. F. (2004). An ERP index of task relevance evaluation of visual stimuli. *Brain and Cognition*, *56*(1), 5–13.
- Potts, G. F., Liotti, M., Tucker, D. M., & Posner, M. I. (1996). Frontal and inferior temporal cortical activity in visual target detection: evidence from high spatially sampled event-related potentials. *Brain Topography*, *9*, 3–14.
- Potts, G. F., & Tucker, D. M. (2001). Frontal evaluation and posterior representation in target detection. *Cognitive Brain Research*, *11*(1), 147–156.

- Rabbitt, P. M. A. (1966). Errors and error correction in choice reaction tasks. *Journal of Experimental Psychology*, *71*, 264–272.
- Rabbitt, P. (1997). *Methodology of frontal and executive function*. Hove, East Sussex, U.K.: Psychology Press.
- Raven, J., Raven, J.C., & Court, J.H. (1998). *Advanced progressive matrices*. Oxford Psychologists Press, Oxford.
- Raz, N. (2008). 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.), *Handbook of aging and cognition-II* (pp. 1–90). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Reuter-Lorenz, P. A., & Cappell, K. (2008). Neurocognitive aging and the compensation hypothesis. *Current Directions in Psychological Science*, *18*, 177–182.
- Reuter-Lorenz, P. A., Jonides, J., Smith, E. E., Hartley, A., Miller, A., Marshuetz, C., & Koeppel, R. A. (2000). Age differences in the frontal lateralization of verbal and spatial working memory revealed by PET. *Journal of cognitive neuroscience*, *12*(1), 174–187.
- Reuter-Lorenz, P. A., & Lustig, C. (2005). Brain aging: reorganizing discoveries about the aging mind. *Current opinion in neurobiology*, *15*(2), 245–251.
- Reuter-Lorenz, P. A., & Park, D. C. (2010). Human neuroscience and the aging mind: a new look at old problems. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, *65*(4), 405–415.
- Ridderinkhof, K. R., Ullsperger, M., Crone, E. A., & Nieuwenhuis, S. (2004). The role of the medial frontal cortex in cognitive control. *Science*, *306*(5695), 443–447.
- Riis, J. L., Chong, H., McGinnis, S., Tarbi, E., Sun, X., Holcomb, P. J., Rentz, D. M., & Daffner, K. R. (2009). Age-related changes in early novelty processing as measured by ERPs. *Biological Psychology*, *82*, 33–44.
- Riis, J. L., Chong, H., Ryan, K. K., Wolk, D. A., Rentz, D. M., Holcomb, P. J., & Daffner, K. R. (2008). Compensatory neural activity distinguishes different patterns of normal cognitive aging. *Neuroimage*, *39*(1), 441–454.
- Roberts, L. E., Rau, H., Lutzenberger, W., & Birbaumer, N. (1994). Mapping P300 waves onto inhibition: Go/No-Go discrimination. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, *92*(1), 44–55.
- Robertson, I. H., Manly, T., Andrade, J., Baddeley, B. T., & Yiend, J. (1997). 'Oops!': performance correlates of everyday attentional failures in traumatic brain injured and normal subjects. *Neuropsychologia*, *35*(6), 747–758.
- Roca, J., Fuentes, L. J., Marotta, A., López-Ramón, M. F., Castro, C., Lupiáñez, J., & Martella, D. (2012). The effects of sleep deprivation on the attentional functions and vigilance. *Acta psychologica*, *140*(2), 164–176.

- Roche, R. A. P., Garavan, H., Foxe, J. J., & O'Mara, S. M. (2005). Individual differences discriminate event-related potentials but not performance during response inhibition. *Experimental Brain Research, 160*, 60–70.
- Roger, C., Bénar, C. G., Vidal, F., Hasbroucq, T., & Burle, B. (2010). Rostral Cingulate Zone and correct response monitoring: ICA and source localization evidences for the unicity of correct-and error-negativities. *Neuroimage, 51*(1), 391–403.
- Romero, R., & Polich, J. (1996). P3(00) habituation from auditory and visual stimuli. *Physiology & behavior, 59*(3), 517–522.
- Rose, C. L., Murphy, L. B., Byard, L., & Nikzad, K. (2002). The role of the Big Five personality factors in vigilance performance and workload. *European Journal of Personality, 16*(3), 185–200.
- Rosvold, H. E., Mirsky, A. F., Sarason, I., Bransome Jr, E. D., & Beck, L. H. (1956). A continuous performance test of brain damage. *Journal of Consulting Psychology, 20*(5), 343–350
- Rush, B. K., Barch, D. M., & Braver, T. S. (2006). Accounting for cognitive aging: context processing, inhibition or processing speed?. *Aging, Neuropsychology and Cognition, 13*(3–4), 588–610.
- Ryan, R. M., La Guardia, J. G., Solky-Butzel, J., Chirkov, V., & Kim, Y. (2005). On the interpersonal regulation of emotions: Emotional reliance across gender, relationships, and cultures. *Personal Relationships, 12*(1), 145–163.
- Rypma, B., & D'Esposito, M. (2001). Age-related changes in brain–behavior relationships: evidence from event-related functional MRI studies. *European Journal of Cognitive Psychology, 13*, 235–256.
- Sagaspe, P., Taillard, J., Amiéva, H., Beck, A., Rascol, O., Dartigues, J. F., ... & Philip, P. (2012). Influence of age, circadian and homeostatic processes on inhibitory motor control: A Go/Nogo Task Study. *PloS one, 7*(6), e39410.
- Salthouse, T. A. (1979). Adult age and the speed-accuracy trade-off. *Ergonomics, 22*(7), 811–821.
- Salthouse, T. A. (1991). *Theoretical perspectives on cognitive aging*. Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum.
- Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological review, 103*(3), 403–428.
- Sanford, A. J., & Maule, A. J. (1971). Age and the distribution of observing responses. *Psychonomic Science, 23*(6), 419–420.
- Santesso, D. L., Segalowitz, S. J., & Schmidt, L. A. (2005). ERP correlates of error monitoring in 10-year olds are related to socialization. *Biological Psychology, 70*(2), 79–87.
- Sarter, M., & Paolone, G. (2011). Deficits in attentional control: cholinergic mechanisms and circuitry-based treatment approaches. *Behavioral neuroscience, 125*(6), 825–835.
- Sarter, M., Gehring, W. J., & Kozak, R. (2006). More attention must be paid: the neurobiology of attentional effort. *Brain Research Reviews, 51*, 145–160.

- Sarter, M., Givens, B., & Bruno, J. P. (2001). The cognitive neuroscience of sustained attention: where top-down meets bottom-up. *Brain research reviews*, *35*(2), 146–160.
- Schneider, B.A., & Pichora-Fuller, M.K. (1999). Implications of perceptual deterioration for cognitive aging research. In F. I. M. Craik, & T. A. Salthouse (Eds.), *The handbook of aging and cognition*. Hillsdale, N.J.; Hove: Lawrence Erlbaum.
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological review*, *84*(1), 1.
- Schnittger, C., Johannes, S., Arnavaz, A., & Munte, T. F. (1997). Relation of cerebral blood flow velocity and level of vigilance in humans. *NeuroReport*, *8*, 1637–1639.
- Schreiber, M., Pietschmann, M., Kathmann, N., & Endrass, T. (2011). ERP correlates of performance monitoring in elderly. *Brain and cognition*, *76*(1), 131–139.
- Schreiber, M., Endrass, T., Weigand, A., & Kathmann, N. (2012). Age effects on adjustments of performance monitoring to task difficulty. *Journal of Psychophysiology*, *26*(4), 145–153.
- Shalgi, S., Barkan, I., & Deouell, L. Y. (2009). On the positive side of error processing: error-awareness positivity revisited. *European Journal of Neuroscience*, *29*(7), 1522–1532.
- Shallice T. (1988). *From neuropsychology to mental structure*. Cambridge University Press.
- Sharp, D. J., Scott, S. K., Mehta, M. A., & Wise, R. J. (2006). The neural correlates of declining performance with age: evidence for age-related changes in cognitive control. *Cerebral Cortex*, *16*(12), 1739–1749.
- Shaw, T. H., Guagliardo, L., de Visser, E., & Parasuraman, R. (2010, September). Using transcranial doppler sonography to measure cognitive load in a command and control task. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 54, No. 3, pp. 249–253). SAGE Publications.
- Shaw, T. H., Warm, J. S., Finomore, V., Tripp, L., Matthews, G., Weiler, E., & Parasuraman, R. (2009). Effects of sensory modality on cerebral blood flow velocity during vigilance. *Neuroscience letters*, *461*(3), 207–211.
- Simões-Franklin, C., Hester, R., Shpaner, M., Foxe, J. J., & Garavan, H. (2010). Executive function and error detection: the effect of motivation on cingulate and ventral striatum activity. *Human brain mapping*, *31*(3), 458–469.
- Smallwood, J., Davies, J. B., Heim, D., Finnigan, F., Sudberry, M. V., O'Connor, R. C., & Obonsawin, M. (2004). Subjective experience and the attentional lapse: task engagement and disengagement during sustained attention. *Consciousness and Cognition*, *4*, 657–690.
- Smallwood, J., Obonsawin, M. C., & Heim, S. D. (2003). Task Unrelated Thought: the role of distributed processing. *Consciousness and Cognition*, *12*(2), 169–189.
- Smith, G. A., & Brewer, N. (1995). Slowness and age: speed-accuracy mechanisms. *Psychology and aging*, *10*(2), 238.

- Staub, B., Doignon-Camus, N., Bacon, E., & Bonnefond, A. (2014). Investigating sustained attention ability in the elderly by using two different approaches: Inhibiting ongoing behavior versus responding on rare occasions. *Acta psychologica, 146*, 51–57.
- Staub, B., Doignon-Camus, N., Bacon, E., & Bonnefond, A. (in press). The effects of aging on sustained attention ability: an ERP study. *Psychology and aging*.
- Staub, B., Doignon-Camus, N., Després, O., & Bonnefond, A. (2013). Sustained attention in the elderly: What do we know and what does it tell us about cognitive aging?. *Ageing research reviews, 12*(2), 459–468.
- Stawarczyk, D., Grandjean, J., Salmon, E., & Collette, F. (2012). Perceptual and motor inhibitory abilities in normal aging and Alzheimer disease (AD): A preliminary study. *Archives of gerontology and geriatrics, 54*(2), e152–e161.
- Stevenson, H., Russell, P. N., & Helton, W. S. (2011). Search asymmetry, sustained attention, and response inhibition. *Brain and Cognition, 20*, 1732–1737.
- Sturm, W., & Willmes, K. (2001). On the functional neuroanatomy of intrinsic and phasic alertness. *Neuroimage, 14*(1), S76–S84.
- 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 Sciences, 769*(1), 191–212.
- Surwillo, W. W., & Quilter, R. E. (1964). Vigilance, Age, and Response-Time. *American Journal of Psychology, 77*, 614–620.
- Tachibana, H., Aragane, K., & Sugita, M. (1996). Age-related changes in event-related potentials in visual discrimination tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 100*, 299–309.
- Talland, G.A. (1966). Visual signal detection, as a function of age, input rate, and signal frequency. *Journal of Psychology 63*(1), 105–115.
- Tana, M. G., Montin, E., Cerutti, S., & Bianchi, A. M. (2010). Exploring cortical attentional system by using fMRI during a continuous performance test. *Computational intelligence and neuroscience, 2010*, 3.
- Teichner, W. H. (1974). The detection of a simple visual signal as a function of time on watch. *Human Factors, 16*, 339–353.
- Temple, J. G., Warm, J. S., Dember, W. N., Jones, K. S., LaGrange, C. M., & Matthews, G. (2000). The effects of signal salience and caffeine on performance, workload, and stress in an abbreviated vigilance task. *Human Factors, 42*, 183–194.
- Terracciano, A., McCrae, R. R., Brant, L. J., & Costa, P. T. (2005). Hierarchical linear modelling analyses of the NEO-PI-R scales in the Baltimore longitudinal study of aging. *Psychology and aging, 20*, 493–506.

- Thackray, R. I., & Touchstone, R. M. (1981). *Age-related differences in complex monitoring performance* (No. FAA-AM-81-12). FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION WASHINGTON DC OFFICE OF AVIATION MEDICINE.
- Themanson, J. R., Hillman, C. H., & Curtin, J. J. (2006). Age and physical activity influences on action monitoring during task switching. *Neurobiology of Aging, 27*(9), 1335–1345.
- Thompson, L. W., Opton Jr, E., & Cohen, L. D. (1963). Effects of age, presentation speed, and sensory modality on performance of a "vigilance" task. *Journal of gerontology, 18*, 366–369.
- Titov, N., & Knight, R. G. (1997). Adult age differences in controlled and automatic memory processing. *Psychology and aging, 12*(4), 565–573.
- Tomprowski, P. D., & Tinsley, V. F. (1996). Effects of memory demand and motivation on sustained attention in young and older adults. *American Journal of Psychology, 109*(2), 187–204.
- Tops, M., Boksem, M. A., Wester, A. E., Lorist, M. M., & Meijman, T. F. (2006). Task engagement and the relationships between the error-related negativity, agreeableness, behavioral shame proneness and cortisol. *Psychoneuroendocrinology, 31*(7), 847–858.
- Tune, G.S. (1966). Errors of commission as a function of age and temperament in a type of vigilance task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 18*(4), 358–361.
- Ullsperger, M., Harsay, H. A., Wessel, J. R., & Ridderinkhof, K. R. (2010). Conscious perception of errors and its relation to the anterior insula. *Brain Structure and Function, 214*(5-6), 629–643.
- Vallerand, R. J., O'Connor, B. P., & Hamel, M. (1995). Motivation in later life: Theory and assessment. *The International Journal of Aging & Human Development, 41*(3), 221–238.
- Vallesi, A. (2011). Targets and non-targets in the aging brain: A go/nogo event related potential study. *Neuroscience Letters, 487*, 313–317.
- Vallesi, A., & Stuss, D. T. (2010). Excessive sub-threshold motor preparation for nontarget stimuli in normal aging. *Neuroimage, 50*, 1251–1257.
- Vallesi, A., Stuss, T. D., McIntosh, A. R., & Picton, T. W. (2009). Age-related differences in processing irrelevant information: Evidence from event-related potentials. *Neuropsychologia, 47*, 577–586.
- van Boxtel, G. J., & Böcker, K. B. (2004). Cortical measures of anticipation. *Journal of Psychophysiology, 18*(2-3), 61–76.
- van Veen, V., & Carter, C. S. (2002). The timing of action-monitoring processes in the anterior cingulate cortex. *Journal of cognitive neuroscience, 14*(4), 593–602.
- van Veen, V., & Carter, C. S. (2006a). Conflict and cognitive control in the brain. *Current Directions in Psychological Science, 15*(5), 237–240.
- van Veen, V., & Carter, C. S. (2006b). Error detection, correction, and prevention in the brain: a brief review of data and theories. *Clinical EEG and neuroscience, 37*(4), 330–335

- van Veen, V., Cohen, J. D., Botvinick, M. M., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2001). Anterior cingulate cortex, conflict monitoring, and levels of processing. *Neuroimage*, *14*(6), 1302–1308.
- Velanova, K., Lustig, C., Jacoby, L. L., & Buckner, R. L. (2007). Evidence for frontally mediated controlled processing differences in older adults. *Cerebral Cortex*, *17*, 1033–1046.
- Vidal, F., Hasbroucq, T., Grapperon, J., & Bonnet, M. (2000). Is the 'error negativity' specific to errors? *Biological psychology*, *51*(2), 109–128.
- Walter, W., Cooper, R., Aldridge, V. J., McCallum, W. C., & Winter, A. L. (1964). Contingent negative variation: an electric sign of sensori-motor association and expectancy in the human brain. *Nature*, *203*, 380–384.
- Warm, J. S., Parasuraman, R., & Matthews, G. (2008). Vigilance requires hard mental work and is stressful. *Human Factors*, *50*, 433–441.
- Warm, J.S. (1984). An introduction to vigilance. In J. S. Warm (Ed.), *Sustained attention in human performance*. Chichester [West Sussex]; New York: Wiley.
- Warm, J.S. (1993). Vigilance and target detection. In B. M. Huey, & C. D. Wickens (Eds.), *Workload transition implications for individual and team performance*. Washington, DC: National Academy Press.
- Warm, J. S., & Jerison, H. J. (1984). The psychophysics of vigilance. In J. S. Warm (Ed.), *Sustained attention in human performance* (pp. 15–59). Chichester, UK: Wiley.
- Washer, E., Falkenstein, M., & Wild-Wall, N. (2011). Age related strategic differences in processing irrelevant information. *Neuroscience Letters*, *487*, 66–69.
- Wechsler, D. A. (1997). *Wechsler Adult Intelligence Scale* (3rd ed.). San Antonio, TX: The Psychological Corporation.
- Welford, A. T. (1965). Performance, biological mechanisms and age: a theoretical sketch. In A. T. Welford, & J. E. Birren, (Eds), *Behaviour, aging and the Nervous System*. Springfield, IL: Charles C. Thomas.
- West, R. L. (1996). An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. *Psychological Bulletin*, *120*, 272–292.
- West, R. (2003). Neural correlates of cognitive control and conflict detection in the Stroop and digit-location tasks. *Neuropsychologia*, *41*(8), 1122–1135.
- West, R. (2004). The effects of aging on controlled attention and conflict processing in the Stroop task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *16*(1), 103–113.
- West, R., & Alain, C. (2000a). Effects of task context and fluctuations of attention on neural activity supporting performance of the Stroop task. *Brain research*, *873*(1), 102–111.
- West, R., & Alain, C. (2000b). Age-related decline in inhibitory control contributes to the increased Stroop effect observed in older adults. *Psychophysiology*, *37*(2), 179–189.

- West, R., Bailey, K., Tiernan, B. N., Boonsuk, W., & Gilbert, S. (2012). The temporal dynamics of medial and lateral frontal neural activity related to proactive cognitive control. *Neuropsychologia*, *50*(14), 3450–3460.
- West, R., Choi, P., & Travers, S. (2010). The influence of negative affect on the neural correlates of cognitive control. *International Journal of Psychophysiology*, *76*(2), 107–117.
- West, R., Jakubek, K., Wymbs, N., Perry, M., & Moore, K. (2005). Neural correlates of conflict processing. *Experimental brain research*, *167*(1), 38–48.
- West, R., & Moore, K. (2005). Adjustments of cognitive control in younger and older adults. *Cortex*, *41*(4), 570–581.
- West, R., & Schwarb, H. (2006). The influence of aging and frontal function on the neural correlates of regulative and evaluative aspects of cognitive control. *Neuropsychology*, *20*(4), 468–481.
- Wickens, C., Kramer, A., Vanasse, L., & Donchin, E. (1983). Performance of concurrent tasks: a psychophysiological analysis of the reciprocity of information-processing resources. *Science*, *221*(4615), 1080–1082.
- Wild-Wall, N., & Falkenstein, M. (2010). Age-dependent impairment of auditory processing under spatially focused and divided attention: An electrophysiological study. *Biological Psychology*, *83*, 27–36.
- Wild-Wall, N., Falkenstein, M., & Gajewski, P. D. (2012). Neural correlates of changes in a visual search task due to cognitive training. *Neural Plasticity*, *2012*, Article ID 529057 (11 pp).
- Wilkinson, R. (1965). Sleep deprivation. In O. G. Edholm, & A. L. Bacharach (Eds.), *The physiology of human survival*. London; New York: Academic Press.
- Willemsen, R., Falkenstein, M., Schwarz, M., Müller, T., Beste, C. (2011). Effects of aging, Parkinson's disease, and dopaminergic medication on response selection and control. *Neurobiology of Aging*, *32*, 327–335.
- Yeung, N., Botvinick, M. M., & Cohen, J. D. (2004). The neural basis of error detection: conflict monitoring and the error-related negativity. *Psychological review*, *111*(4), 931–959.
- Yordanova, J., Falkenstein, M., Hohnsbein, J., & Kolev, V. (2004). Parallel systems of error processing in the brain. *NeuroImage*, *22*, 590–602.
- Zeef, E. J., Sonke C. J., Kok, A., Buiten, M. M., & Kenemans, J. L. (1996). Perceptual factors affecting age-related differences in focused attention: Performance and psychophysiological analyses. *Psychophysiology*, *33*, 555–565.

ANNEXES

Questionnaire de motivation

Matthews et al., 1999

Veillez répondre à ces quelques questions concernant votre état d'esprit par rapport à la tâche que vous allez réaliser. Indiquez dans quelle mesure vous êtes d'accord avec les propositions ci-dessous en cochant l'une des réponses suivantes :

pas du tout un peu ni l'un ni l'autre beaucoup extrêmement

1. Je m'attends à ce que le contenu de la tâche soit intéressant
2. La seule raison pour laquelle j'effectue cette tâche est la perspective d'une récompense
3. Je préférerais consacrer le temps passé sur la tâche à autre chose
4. Je m'inquiète de ne pas faire de mon mieux
5. J'ai envie de faire mieux que les autres participants
6. Je risque de me lasser de la tâche
7. Je suis désireux(se) de bien faire
8. Je serais déçu(e) si je ne parvenais pas à bien faire
9. Je suis résolu(e) à atteindre mes objectifs de performance
10. Réaliser la tâche en vaut la peine
11. Je m'attends à trouver la tâche ennuyeuse
12. Mes performances me laissent indifférent(e)
13. J'ai envie de réussir la tâche
14. La tâche va faire ressortir mon esprit de compétition
15. Je suis motivé(e) pour réaliser cette tâche

Questionnaire de vagabondage d'esprit

Matthews et al., 1999

Veillez indiquer approximativement la fréquence à laquelle vous avez eu ces pensées lors des dix dernières minutes, en cochant pour chaque proposition l'une des réponses suivantes :

jamais une fois quelquefois souvent très souvent

1. J'ai pensé que je devrais travailler avec plus de soin
2. J'ai pensé au temps qu'il me restait
3. J'ai pensé aux performances des autres participants à cette tâche
4. J'ai pensé à la difficulté de la tâche
5. J'ai pensé à mon niveau d'aptitude
6. J'ai pensé au but de cette expérience
7. J'ai pensé à ce que je ressentirais si on me donnait un retour (feedback) sur mes performances
8. J'ai pensé au nombre de fois où j'ai eu l'esprit confus
9. J'ai pensé à des membres de ma famille
10. J'ai pensé à quelque chose qui a provoqué en moi un sentiment de culpabilité
11. J'ai pensé à des préoccupations personnelles
12. J'ai pensé à quelque chose qui m'a mis en colère
13. J'ai pensé à quelque chose qui s'est passé plus tôt dans la journée
14. J'ai pensé à quelque chose qui s'est passé récemment (ces derniers temps, mais pas aujourd'hui)
15. J'ai pensé à quelque chose qui s'est passé il y a longtemps
16. J'ai pensé à quelque chose qui pourrait se passer à l'avenir

NASA-TLX

Hart & Staveland, 1988

Exigence Mentale - De faible à élevée

Quelle a été l'importance de l'activité mentale et intellectuelle requise (ex. réflexion, décision, calcul, mémorisation, observation, recherche etc.) ? La tâche vous a-t-elle paru simple, nécessitant peu d'attention (faible) ou complexe, nécessitant beaucoup d'attention (élevée) ?

Exigence Physique - De faible à élevée

Quelle a été l'importance de l'activité physique requise (ex. pousser, porter, tourner, marcher, activer, etc.) ? La tâche vous a-t-elle paru facile, peu fatigante, calme (faible) ou pénible, fatigante, active (élevée) ?

Exigence Temporelle - De faible à élevée

Quelle a été l'importance de la pression temporelle causée par la rapidité nécessitée pour l'accomplissement de la tâche ? Était-ce un rythme lent et tranquille (faible) ou rapide et précipité (élevé) ?

Performance - De bonne à mauvaise

Quelle réussite pensez-vous avoir eu dans l'accomplissement de votre tâche ? Comment pensez-vous avoir atteint les objectifs déterminés par la tâche ?

Effort - De faible à élevé

Quel degré d'effort avez-vous dû fournir pour exécuter la tâche demandée, (mentalement et physiquement) ?

Frustration - De faible à élevée

Pendant l'exécution du travail vous êtes-vous senti satisfait, relaxé, sûr de vous (niveau de frustration faible), ou plutôt découragé, irrité, stressé, sans assurance (niveau de frustration élevé) ?

Attention soutenue et vieillissement normal: étude des mécanismes cognitifs et neuronaux associés au contrôle attentionnel

Résumé

L'objectif de ces travaux de thèse était d'avancer dans la connaissance des effets du vieillissement normal sur les capacités d'attention soutenue et les mécanismes de contrôle attentionnel qui les sous-tendent. A cette fin, nous avons combiné l'utilisation de mesures comportementales, subjectives, et électrophysiologiques (potentiels évoqués). Les résultats comportementaux mettent en évidence des effets différenciés de l'âge sur les capacités d'attention soutenue en fonction de l'approche utilisée : détérioration dans les tâches de détection, et préservation dans les tâches d'inhibition. Les données électrophysiologiques mettent en évidence plusieurs spécificités des seniors dans l'engagement des mécanismes de contrôle attentionnel en situation d'attention soutenue : une activation globalement plus importante de ces mécanismes, une activation maintenue ou augmentée de ces mécanismes au fil de la tâche, et une topographie plus frontale des régions qui les sous-tendent.

Mots-clés : attention soutenue, contrôle attentionnel, vieillissement normal, potentiels évoqués, baisse de vigilance

Abstract

The purpose of this project was to gain more knowledge about the effects of normal aging on sustained attention ability and attentional control mechanisms underlying this ability. To that end, we combined the use of behavioral, subjective and electrophysiological (event-related potentials) measures. Behavioral results evidenced differential effects of age on sustained attention ability according to the approach used: deterioration in detection tasks, and preservation in inhibition tasks. Electrophysiological data evidenced several special features of seniors regarding the recruitment of attentional control mechanisms in a situation of sustained attention: overall greater activation of these mechanisms, stable or increased activation of these mechanisms over the course of the task, and a more frontal topography of the regions underlying these mechanisms.

Keywords: sustained attention, attentional control, normal aging, event-related potentials, vigilance decrement