

Université de Montréal

**Influence du vieillissement et de la scolarité sur la compréhension du discours :
apport de l'imagerie optique**

par **Charles-Olivier Martin**

Programme de Sciences Biomédicales
Faculté de Médecine

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures en vue de l'obtention du grade de
Philosophae Doctor (PhD) en Sciences Biomédicales Option Générale

Décembre, 2015

© Charles-Olivier Martin, 2015

Université de Montréal
Faculté des Études Supérieures

Cette thèse intitulée :
**Influence du vieillissement et de la scolarité sur la compréhension du discours :
apport de l'imagerie optique**

présenté par :
Charles-Olivier Martin

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Simona Brambati, présidente-rapporteuse
Bernadette Ska, directrice de recherche
Sven Joubert, membre du jury interne
Laura Monetta, examinatrice externe
Pierre Rainville, représentant du doyen de la FES

Résumé

La compréhension du discours, et son évolution au cours du vieillissement, constitue un sujet d'une grande importance par sa complexité et sa place dans la préservation de la qualité de vie des aînés. Les objectifs de cette thèse étaient d'évaluer l'influence du vieillissement et du niveau de scolarité sur les capacités de compréhension du discours et sur l'activité cérébrale s'y rattachant. Pour ce faire, trois groupes (jeunes adultes ayant un niveau universitaire de scolarité, personnes âgées ayant un niveau universitaire de scolarité et personnes âgées ayant un niveau secondaire de scolarité) ont réalisé une tâche où ils devaient lire de courtes histoires, puis estimer la véracité d'une affirmation concernant cette histoire. Les capacités de compréhension correspondant aux traitements de trois niveaux du modèle de construction-intégration de Kintsch (la microstructure, la macrostructure et le modèle de situation) ont été évaluées. L'imagerie optique (NIRS) a permis d'estimer les variations d'oxyhémoglobine (HbO) et de déoxyhémoglobine (HbR) tout au long de la tâche.

Les résultats ont démontré que les personnes âgées étaient aussi aptes que les plus jeunes pour rappeler la macrostructure (essentiel du texte), mais qu'ils avaient plus de difficulté à rappeler la microstructure (détails) et le modèle de situation (inférence et intégration) suite à la lecture de courts textes. Lors de la lecture, les participants plus âgés ont également montré une plus

grande activité cérébrale dans le cortex préfrontal dorsolatéral gauche, ce qui pourrait être un mécanisme de compensation tel que décrit dans le modèle CRUNCH.

Aucune différence significative n'a été observée lors de la comparaison des participants âgés ayant un niveau universitaire de scolarité et ceux ayant un niveau secondaire, tant au niveau des capacités de compréhension que de l'activité cérébrale s'y rattachant. Les deux groupes ont cependant des habitudes de vie stimulant la cognition, entre autres, de bonnes habitudes de lecture. Ainsi, ces habitudes semblent avoir une plus grande influence que l'éducation sur les performances en compréhension et sur l'activité cérébrale sous-jacente. Il se pourrait donc que l'éducation influence la cognition en promouvant des habitudes favorisant les activités cognitives, et que ce soit ces habitudes qui aient en bout ligne un réel impact sur le vieillissement cognitif.

Mots clés : compréhension du discours, vieillissement, vieillissement cognitif, éducation, scolarité, lecture, plasticité cérébrale, imagerie optique, langage

Abstract

Discourse comprehension, and its evolution through aging, is a subject of importance by its complexity and its place in the preservation of life's quality. The objectives of this thesis were to evaluate the influence of aging and level of education on discourse comprehension capacities and their related underlying brain activity. To achieve this, three groups (young adults with a university education, elderly adults with a university education and elderly adults with a high school education) carried out a task where they read short stories and answered probes about those stories. Discourse comprehension capacities were evaluated through three processing levels of the Kintsch's construction-integration model (microstructure, macrostructure and situation model). Using NIRS, the variation of oxyhemoglobin (HbO) and deoxyhemoglobin (HbR) concentrations was estimated through the task.

Results indicated that elderly adults were as capable as younger adults to recall the macrostructure (gist of the text), but that they had more difficulties to recall microstructure (details) and the situation model (inference and integration) after reading short texts. While reading, elderly adults also showed greater brain activity in the left dorsolateral prefrontal cortex which could be a compensatory mechanism similar to the one described in the CRUNCH model.

No significant difference was observed between participants having a university education and those having a high school education on discourse comprehension capacities and the underlying brain activity. Nevertheless, the two groups had maintained cognitively stimulating life habits, particularly great reading habits. Thus, those habits seem to have a greater influence than education on the performance in comprehension and on the underlying brain activity. Maybe higher education promotes more cognitive habits, and ultimately, it is those habits that seem to have a real impact on cognitive aging.

Keywords: discourse comprehension, aging, cognitive aging, education, reading, cerebral plasticity, NIRS, language

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	v
Liste des tableaux	x
Liste des figures	xii
Liste des abréviations	xiv
Remerciements	xv
Chapitre 1 : Introduction générale.....	1
1. Vieillessement	3
1.1. Vieillessement cognitif.....	5
2. Plasticité cérébrale chez les personnes âgées	8
2.1. Le modèle HAROLD	10
2.2. Le modèle PASA	14
2.3. Le modèle CRUNCH.....	17
2.4. La théorie de la réserve cognitive	21
2.5. La théorie de l'échafaudage cognitif.....	26
2.6. Les facteurs influençant la plasticité cérébrale et le maintien des fonctions cognitives	30
3. Compréhension du discours.....	34
3.1. Les niveaux de compréhension du texte	35
3.2. Les mécanismes et fonctions cognitives impliqués dans le modèle de construction-intégration de Kintsch.....	47
3.3. Neuroanatomie de la compréhension du discours.....	52
3.4. Vieillessement et compréhension du discours	55
4. Neuroimagerie	59
4.1. Imagerie Spectroscopique proche infrarouge	61
5. Buts et hypothèses	69

Chapitre 2 : Articles	71
Article I. Narrative discourse in young and older adults: Behavioral and NIRS analyses	73
Abstract.....	75
1. Introduction	76
2. Goal and hypotheses	83
3. Methods	84
4. Results	91
5. Discussion.....	97
6. Conclusion.....	105
References	107
Article II. Does level of education really impact discourse comprehension in aging?	113
Abstract.....	115
1. Introduction	116
2. Goal and hypotheses	121
3. Methods	122
4. Results	129
5. Discussion.....	135
6. Conclusion.....	141
References	144
Article III. Influence of Reading Habits on Cerebral Plasticity for Discourse Comprehension in Aging	149
Abstract.....	151
1. Introduction	152
2. Goal and hypotheses	158
3. Methods	159
4. Results	164
5. Discussion.....	170

6. Conclusion	176
References	177
Chapitre 3 : Discussion générale	183
1. Retour sur les principaux résultats des différentes études	185
1.1. Résultats comportementaux	185
1.2. Résultats de neuroimagerie	190
1.3. Pistes de réflexion sur l'influence des habitudes de lecture	193
2. Compréhension du discours et modèles de plasticité cérébrale.....	196
3. Perspectives d'avenir	202
4. Conclusion	209
Bibliographie	xvii
Annexes	xxxi
ANNEXE I – Textes de la tâche de compréhension du discours	xxxiii

Liste des tableaux

Article I

Table I. Estimation of the Brodmann's Area covered by each region of interest.

Table II. Sociodemographic characteristics of the groups.

Table III. Neuropsychological characteristics of the groups.

Article II

Table I. Estimation of the Brodmann's Area covered by each region of interest.

Table II. Sociodemographic characteristics of the groups.

Table III. Neuropsychological characteristics of the groups.

Article III

Table I. Characteristics of the participants.

Table II. Pearson's correlation coefficient between the accuracy of responses and scores on the reading habits questionnaire for each condition.

Table III. Pearson's correlation coefficient between reaction times and scores on the reading habits questionnaire for each condition.

Table IV. Pearson's correlation coefficient between the variation in HbO concentration and scores on the reading habits questionnaire for each channel in each condition in the older group.

Table V. Pearson's correlation coefficient between the variation in HbO concentration and scores on the reading habits questionnaire for each channel in each condition in the younger group.

Table VI. Pearson's correlation coefficient between the variation in HbR concentration and scores on the reading habits questionnaire for each channel in each condition in the elderly group.

Table VII. Pearson's correlation coefficient between the variation in HbR concentration and scores on the reading habits questionnaire for each channel in each condition in the younger group.

Liste des figures

Revue de littérature

Figure 1. Schéma du parcours de la lumière dans le cerveau lors de l'utilisation de la NIRS.

Article I

Figure 1. Timeline and task design for each block of stimuli.

Figure 2. Positions of sources, detectors and regions of interest.

Figure 3. Accuracy in each condition.

Figure 4. Response time in each condition.

Figure 5. Grand-averaged waveforms of HbO and HbR concentrations during the reading portion of the task.

Figure 6. Grand-averaged waveforms of HbO and HbR concentrations while participants answer the probes.

Article II

Figure 1. Timeline and task design for each block of stimuli.

Figure 2. Positions of sources, detectors and regions of interest.

Figure 3. Reading habits through life.

Figure 4. Accuracy in each condition.

Figure 5. Response time in each condition.

Figure 6. Grand-averaged waveforms of HbO and HbR concentrations during the reading portion of the task.

Figure 7. Grand-averaged waveforms of HbO and HbR concentrations while participants answer the probes.

Article III

Figure 1. The positioning of the sources, detectors and channels.

Figure 2. Distribution of the young and elderly participants based on their score out of 100 for the questionnaire on reading habits throughout their lives.

Figure 3. Relationship between scores for reading habits and reaction times in all three conditions for the younger group.

Figure 4. Relationship between scores for reading habits and reaction times in all three conditions for the older group.

Figure 5. Relationship between the variation in HbO concentration in channel 5 and reading habits for the older group in the macroproposition condition while participants read the story and answered the probe.

Figure 6. Relation between the variation in HbO concentration in channel 7 and reading habits for the older group in the macroproposition condition while the participants read the story and answered the probe.

Liste des abréviations

CRIUGM : Centre de Recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal

CRUNCH : *Compensation-Related Utilization of Neural Circuits Hypothesis*

EEG : Électroencéphalographie

ERP : *Event-Related Potential* ou Potentiel évoqué

HAROLD : *Hemispheric Asymmetry Reduction in Older Adults*

HbO ou HbO₂ : Oxyhémoglobine

HbR : Désoxyhémoglobine

IRMf : Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle

L : *Left*

MEG : Magnétoencéphalographie

MMSE : *Mini-Mental State Evaluation*

MoCA : *Montreal Cognitive Assessment*

NIRS : *Near-Infrared Spectroscopy* ou spectroscopie proche infrarouge

PASA : *Posterior-Anterior Shift in Aging*

R : *Right*

ROI : *Region of Interest*

SMT : Stimulation Magnétique Transcrânienne

STAC : *Scaffolding Theory of Aging and Cognition*

TEP : Tomographie par émission de positons

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les nombreux participants qui prennent part aux projets du centre de recherche et qui nous permettent d'avoir une meilleure compréhension du vieillissement.

J'aimerais ensuite remercier ma directrice de recherche, Bernadette Ska, pour m'avoir soutenu et encouragé tout au long de ce projet de doctorat. Vos conseils et nos discussions me furent d'une aide précieuse dans la réussite de cette thèse. Je me dois aussi de remercier Yves Joannette pour m'avoir si bien accueilli dans son équipe de recherche.

Je souhaite également remercier le personnel de soutien et l'équipe de l'informatique du centre de recherche sans qui la recherche ne serait tout simplement pas possible. Un merci spécial est adressé à Nadia Jaffer qui me fut d'une aide immense lors du recrutement des participants.

J'aimerais également remercier mes collègues pour nos prolifiques discussions. Plus particulièrement, Catrine Demers pour avoir rendu si complet mon stage d'été qui fut le début de ce projet et Mahnoush Amiri pour m'avoir épaulé sur tous les aspects techniques de l'imagerie.

Je tiens aussi à remercier mes stagiaires, Marianne Desrochers, Eric Yamga et Valérie Daoust pour leur contribution au projet. Vos passages, bien que brefs, dans le laboratoire m'ont permis d'avoir des regards neufs sur mes travaux et ont égayé mon doctorat. J'espère vous avoir donné une idée honnête et complète de ce qu'est la recherche et je vous souhaite du succès dans vos futurs projets.

Je dois un immense remerciement à toute ma famille et mes amis, particulièrement mes parents et mes frères pour leur support, que ce soit par leurs encouragements, les nombreux services comme les nombreux repas préparés en période de rédaction ou d'études, les soirées à me changer les idées ou même les améliorations que vous avez apportées au projet comme les modifications du casque d'imagerie. Merci de m'avoir toujours épaulé dans mes projets et d'avoir toujours été là pour moi.

Finalement, je désire remercier mon amoureuse Stéphanie pour les nombreuses relectures de textes pourtant si loin de son domaine et pour son aide durant le traitement des données et les analyses, mais surtout pour être toujours là pour moi, pour savoir endurer mon air souvent bête vers la fin, pour être consciente de quand j'ai besoin d'une pause et pour ton support dans toutes mes idées et mes projets. Je sais maintenant qu'aucun défi ne pourra nous résister.

Chapitre 1 : Introduction générale

1. Vieillessement

Le vieillissement normal entraîne plusieurs changements physiologiques dans le fonctionnement du corps humain et du cerveau. Bien que la plupart de ces changements soient le fruit de l'évolution naturelle du corps, ils ont tout de même un impact sur les capacités physiques et cognitives des individus. Étant donné que cette thèse s'intéressera principalement à la plasticité cérébrale et aux capacités de compréhension du discours, un très bref survol des changements anatomiques du cerveau et des principaux changements cognitifs au cours de la vie sera présenté.

D'abord, sur le plan anatomique, le vieillissement est généralement accompagné d'une diminution du volume de certaines structures, dont le cortex préfrontal, l'hippocampe, le cervelet et le noyau caudé (Raz et al., 2005). Le changement du volume pourrait s'expliquer par des altérations subies par la structure de ces régions et par une diminution du nombre d'embranchements synaptiques et dendritiques des neurones (Burke et Barnes, 2006). Cependant, certaines autres structures, comme le cortex visuel primaire et le cortex entorhinal conservent à peu près le même volume tout au long de la vie (Raz et al., 2005). Une étude rapporte toutefois un amincissement assez généralisé du cortex cérébral (de la surface du cortex à la frontière entre la matière grise et la matière blanche) dans l'ensemble du cerveau (Salat et al., 2004). Des altérations, principalement au niveau de l'intégrité de la structure de la matière

blanche, sont aussi observées dans l'ensemble du cerveau, plus particulièrement dans les régions antérieures (Head et al., 2004). Paradoxalement, malgré l'atrophie observée, le cortex préfrontal est souvent reconnu comme un site de compensation cognitive, étant souvent plus actif chez les personnes âgées que chez les plus jeunes (Greenwood, 2007).

Bien que la diminution du nombre total de neurones soit relativement faible, il serait plus difficile, avec l'âge, de maintenir l'homéostasie au sein des cellules du cerveau, entre autres sur le plan de l'équilibre des réserves de calcium intracellulaire, les rendant ainsi plus vulnérables au stress métabolique causé par la neurodégénérescence et les ischémies (Shankar, 2010). La fonctionnalité de certains neurotransmetteurs serait également affectée, notamment l'efficacité de la dopamine en raison de la diminution de la densité des récepteurs dopaminergiques tout au long de la vie (Wong et al., 1997).

La microvascularisation cérébrale serait également touchée par le vieillissement. En effet, le débit sanguin cérébral serait réduit avec l'âge en raison de la raréfaction des capillaires et des artérioles ainsi que de l'altération de la forme et de la structure des vaisseaux dans certaines régions (Riddle et al., 2003). Les capacités dilatatoires des artérioles, servant notamment à augmenter l'apport d'oxygène en cas d'hypoxie, déclinaient également lors du vieillissement (Safonova et al., 2004). Dans certains cas, ces changements pourraient éventuellement réduire la perfusion de certaines régions cérébrales et

ainsi nuire à l'apport de nutriments, tel l'oxygène et le glucose, et à l'évacuation des déchets, tel le CO₂ (Farkas et Luiten, 2001).

Bien que tous ces changements aient vraisemblablement un effet sur la cognition humaine, les fonctions cognitives n'évoluent pas toutes de la même façon avec l'âge.

1.1. Vieillessement cognitif

La cognition correspond à l'ensemble des fonctions servant au traitement de l'information perçue, puis à la production d'une réponse appropriée. Ces fonctions comprennent notamment la mémoire, l'attention, l'inhibition, la perception, la planification, la prise de décision et le langage (Purves et al., 2005). Les différents processus cognitifs sont réalisés par les vastes réseaux neuronaux faisant partie du cerveau humain. Les changements observés dans les réseaux neuronaux décrits plus tôt affectent donc, à leur tour, les fonctions cognitives. Cependant, l'impact de ces changements diffère grandement d'une fonction cognitive à l'autre. La présente section discutera de l'évolution de quelques fonctions cognitives avec l'âge.

La mémoire de travail et la vitesse de traitement sont souvent citées comme étant des fonctions cognitives qui déclinent fréquemment avec l'âge et avec un impact sur les autres fonctions cognitives (Lemaire et Bherer, 2005).

Pour ce qui est de la mémoire de travail, les personnes âgées auraient souvent plus de difficulté que les plus jeunes à maintenir l'information lorsque celle-ci est volumineuse, par exemple lorsque le nombre de chiffres augmentent dans une tâche de calcul (Oberauer et al., 2003). Les études montrent également une diminution de l'empan mnésique de simple stockage temporaire (Verhaeghen et al., 1993) ainsi qu'une diminution de l'empan de lecture et de l'empan calculatoire avec l'avancement en âge (Park et al., 1996).

De son côté, la vitesse de traitement déclinerait progressivement tout au long de la vie et jouerait un grand rôle dans l'apparence de déclin de plusieurs autres fonctions cognitives (Salthouse, 1993, Lemaire et Bherer, 2005). Par exemple, le ralentissement du traitement cognitif de l'information fait en sorte que cette dernière doit être maintenue plus longtemps en mémoire de travail, accentuant les troubles lui étant associé. Le déclin de la vitesse de traitement aurait une incidence sur les performances cognitives en nuisant à l'exécution efficace des mécanismes nécessaires en raison du temps limité pour les tâches ou en rendant le résultat des premiers processus inaccessible une fois les derniers processus complétés (Salthouse, 1996). Le déclin de la vitesse de traitement pourrait être causé par la dégradation de la matière blanche, donc des axones des neurones, rendant la transmission de l'information plus lente (Park et Reuter-Lorenz, 2009).

La mémoire épisodique, mémoire des événements vécus et de leur contexte, serait le type de mémoire subissant le déclin le plus marqué lors du vieillissement (Nilsson, 2003). À l'inverse, la mémoire sémantique, mémoire des faits et des concepts, et la mémoire procédurale demeureraient à peu près stables tout au long de la vie adulte (Nilsson, 2003). Le maintien de l'organisation des informations contenues dans la mémoire à long terme serait l'un des aspects de la mémoire les mieux conservés au cours du vieillissement (Lemaire et Bherer, 2005). Cette organisation solide entraîne une bonne préservation de la relation sémantique unissant les mots et les concepts. Ainsi, les décisions lexicales sont plus rapides lorsque les amorces et les cibles sont reliées sémantiquement, et ce, peu importe l'âge (Howard et al., 1986, Lemaire et Bherer, 2005).

L'attention sélective, l'une des multiples dimensions de l'attention, permet de repérer les informations utiles et d'ignorer ou d'inhiber les informations inutiles. Le déclin de l'attention sélective avec l'âge serait notamment observé dans des tâches de recherche visuelle (Hommel et al., 2004), d'identification de son cible et d'inhibition de son distracteur (Gaeta et al., 2001) et d'inhibition de listes de mots précédemment apprises, mais devant être oubliées (faisant alors office d'interférence) (Zacks et al., 1996). Il serait donc plus difficile pour les personnes âgées d'inhiber les stimuli ou les informations non pertinentes, tant dans des modalités auditives que visuelles,

ralentissant ainsi la sélection des stimuli ou des informations pertinentes à la tâche en cours.

Bien qu'un profil relativement général des fonctions cognitives soit observé dans les études portant sur le vieillissement, la population âgée demeure très hétérogène et les capacités cognitives varient énormément d'une personne à l'autre. La plasticité cérébrale individuelle joue donc également un grand rôle dans le vieillissement et dans l'évolution des fonctions cognitives.

2. Plasticité cérébrale chez les personnes âgées

Avant même la naissance, et continuant durant l'enfance, les neurones, puis les réseaux neuronaux, se différencient et se spécialisent développant une grande diversité de formes et de fonctions (Purves et al., 2005). Tout au long de la vie, des synapses se forment et d'autres sont éliminées, certains neurones se développent et d'autres s'atrophient et meurent (Purves et al., 2005). Cette plasticité neuronale très dynamique, influencée par l'expérience et le vécu des individus, se poursuit, bien qu'à un rythme moins rapide que lors de l'enfance, jusqu'à la mort. Évidemment, cette plasticité des réseaux neuronaux a un effet important sur les capacités cognitives chez l'humain, d'abord dans leur développement, puis dans leur maintien.

Cette évolution constante du cerveau, influencée par l'expérience de vie unique à chacun, se fait différemment d'une personne à l'autre. Cette diversité d'évolution des réseaux neuronaux et cognitifs pourrait expliquer en partie la variabilité des capacités cognitives entre les individus, qui s'accroît avec l'âge, observée dans certaines études (Hultsch et al., 2002, Lopez-Higes et al., 2010). La plasticité du cerveau lui confère une certaine capacité à s'adapter et à surmonter la perte partielle, ou le déclin, de certaines fonctions cognitives occasionnée par l'âge ou par des lésions. Par exemple, certaines personnes souffrant d'aphasie, suite à un accident vasculaire cérébral dans l'hémisphère gauche du cerveau, ont pu récupérer en grande partie leur capacité langagière grâce, entre autre, au recrutement de nouveaux réseaux neuronaux dans l'hémisphère gauche, à une réparation partielle de certains réseaux lésés et à une augmentation de l'implication de l'hémisphère droit dans les processus langagiers (Cao et al., 1999).

La préservation des habiletés cognitives avec l'âge dépend donc des capacités de plasticité et de réorganisation du cerveau, c'est-à-dire de sa flexibilité et de sa capacité à pallier la détérioration de certaines structures neuronales (Ansado et al., 2013). D'ailleurs, plusieurs modèles et théories décrivent cette dynamique complexe visant un vieillissement cognitif optimal. Par contre, aucun d'eux ne peut expliquer seul l'ensemble des modifications réellement présentes chez les personnes âgées (Ansado et al., 2013). En fait, les patrons d'organisation observés dépendent de plusieurs paramètres, dont le type

de tâche, les processus cognitifs nécessaires à la tâche, le niveau de difficulté des tâches et les stratégies cognitives utilisées (Ansado et al., 2013). Il est donc clair que plus d'un modèle soit nécessaire pour expliquer l'ensemble de l'évolution du cerveau au cours de la vie et même, à plus petite échelle, les modifications observées lors de certaines tâches cognitives complexes chez les personnes âgées.

La présente section décrira les modèles d'organisation cérébrale, chez les personnes âgées, les plus acceptés ainsi que les différents facteurs qui semblent favoriser une plus grande plasticité liée au vieillissement.

2.1. Le modèle HAROLD

Le modèle HAROLD (*Hemispheric Asymmetry Reduction in Older Adults*) décrit une modification de l'organisation inter-hémisphérique observée chez certaines personnes âgées. Dans ce modèle, il est question de l'observation d'une diminution de l'asymétrie hémisphérique de l'activité cérébrale, ou en d'autres termes, d'une augmentation de la bilatéralisation de cette activité, chez certaines personnes âgées en comparaison aux personnes plus jeunes (Cabeza, 2002).

Cabeza répertorie des patrons d'activation qui s'apparentent au modèle HAROLD dans le cortex préfrontal dans plusieurs études portant sur la

récupération en mémoire épisodique ou sémantique, sur l'encodage de la mémoire épisodique, sur la mémoire de travail, la perception des visages et le contrôle de l'inhibition (Cabeza, 2002). Bien que le modèle fut principalement bâti à partir d'études sur le cortex préfrontal, des indices portent à croire que le phénomène HAROLD serait également observable dans le cortex temporal et le cortex pariétal, notamment lors de tâches de perception et d'encodage de visages et de contrôle de l'inhibition (Cabeza et al., 2002).

Deux hypothèses pourraient expliquer la délatéralisation de l'activité cérébrale chez certaines personnes âgées telle que décrite dans le modèle HAROLD : une hypothèse de dédifférenciation et une hypothèse de compensation. L'hypothèse de dédifférenciation propose que les réseaux neuronaux deviendraient moins spécialisés avec l'âge, notamment à cause d'une dégradation de ces réseaux, entraînant ainsi leur activation pour un plus grand nombre de tâches (Cabeza, 2002). Cette hypothèse serait supportée par la plus grande corrélation observée entre les régions d'activité cérébrale dans différents types de tâches chez les personnes plus âgées (Cabeza, 2002). C'est-à-dire que les mêmes régions seraient actives dans plusieurs types de tâches à l'inverse de ce qui se passe chez les plus jeunes, signe possible d'une diminution de la spécialisation des régions cérébrales lors du vieillissement. La conséquence de cette possible dédifférenciation devrait être un déclin des capacités cognitives des individus. Ainsi, selon cette hypothèse, le phénomène HAROLD serait une des causes du déclin cognitif. Ensuite, une hypothèse de

compensation propose que la délatéralisation observée selon le modèle HAROLD serait le reflet d'une stratégie établie par le cerveau visant à contrecarrer le déclin cognitif dû au vieillissement en recrutant également les régions controlatérales aux régions utilisées chez les plus jeunes (Cabeza, 2002). Cette hypothèse serait, entre autres, supportée par le fait que la bilatéralisation est associée à une meilleure récupération des fonctions cognitives suite à des lésions cérébrales tels certains accidents vasculaires cérébraux et certains traumatismes crâniens (Cabeza, 2002).

Des études ont pu tester ces hypothèses en comparant un groupe de participants maintenant de bonnes capacités cognitives et un groupe de participants ne maintenant pas de bonnes capacités cognitives à un groupe plus jeune. Elles ont montré que la délatéralisation décrite par le modèle HAROLD était présente uniquement chez les personnes âgées réussissant aussi bien que les plus jeunes à différents tests de mémoire et non chez les personnes âgées ayant des résultats moins bons que ceux des plus jeunes (Cabeza et al., 2002, Dolcos et al., 2002). Cette observation favorise l'hypothèse de compensation au détriment de l'hypothèse de dédifférenciation. D'une part, l'hypothèse de compensation est validée, car la délatéralisation semble permettre aux participants de mieux réussir et de maintenir de bonnes performances aux tests de mémoire, et donc probablement de compenser les effets de l'âge sur le cerveau (Cabeza, 2002, Cabeza et al., 2002, Dolcos et al., 2002). D'autre part, l'hypothèse de dédifférenciation est invalidée puisque le concept de

dédiérenciation, soit une perte de la spécialisation acquise par les réseaux neuronaux lors de l'enfance, devrait être plus marqué chez les personnes réussissant moins bien aux tâches cognitives (Cabeza et al., 2002). Bien qu'il ne soit pas impossible qu'à un certain degré un type de dédiérenciation puisse faire partie du processus de développement des stratégies compensatoires mises en branle par le cerveau lors du vieillissement, le phénomène HAROLD s'harmonise bien davantage avec l'hypothèse de compensation (Cabeza, 2002).

L'étude de Cabeza et al. (2002) note également que tous les patients âgés, ayant ou non bien réussi les différents tests de mémoire, démontraient une plus grande activité cérébrale dans les mêmes régions actives chez les plus jeunes. Cette plus grande activation des régions utilisées par les plus jeunes pourrait démontrer une stratégie de compensation inefficace, car bien que l'activation soit plus importante, il n'y a pas de nouveaux réseaux recrutés et cette plus grande activité ne semble pas suffisante à la bonne réussite des tests dans le cas des participants moins performants (Cabeza et al., 2002). La bilatéralisation observée chez les participants plus performants était également plus marquée lors de la réalisation des tâches plus exigeantes démontrant une activation des régions controlatérales aux régions attendues encore plus grande (Cabeza et al., 2002, Dolcos et al., 2002).

Bref, le modèle HAROLD consiste en une réorganisation cérébrale inter-hémisphérique où uniquement les personnes âgées réussissant mieux les

tâches cognitives démontrent une bilatéralisation accrue de l'activité cérébrale par rapport aux plus jeunes. Le phénomène HAROLD est probablement le reflet de stratégies mises en place par le cerveau pour pallier certains déclin cognitifs survenant avec l'âge.

2.2. Le modèle PASA

Le modèle PASA (*Posterior-Anterior Shift in Aging*) décrit une modification de l'organisation intra-hémisphérique observée chez certaines personnes âgées. Plus précisément, il y est question d'une augmentation de l'activité frontale et préfrontale couplée à une réduction de l'activité occipitale et pariétale chez ces derniers, par rapport aux personnes plus jeunes (Davis et al., 2008). Ce phénomène serait le reflet d'un mécanisme compensatoire permettant de pallier un possible déclin des régions postérieures dans le vieillissement (Davis et al., 2008). Par exemple, il serait possible qu'une augmentation de l'activité dans le cortex frontal, afin de recruter davantage de ressources attentionnelles, compense le déclin des processus sensoriels du cortex occipital (Madden, 2007, Ansado et al., 2012).

Cette réorganisation intra-hémisphérique fut observée notamment lors de tâches de récupération de mémoire épisodique et de perception visuelle (Davis et al., 2008), lors de tâches de traitement visuel d'objet et de traitement visuel spatial (Grady et al., 1994) et lors de tâches d'attention sélective (Ansado

et al., 2012). Le phénomène PASA fut également observé dans la dynamique de désactivation des réseaux par défaut, réseaux normalement actifs en période de repos conscient, mais inactifs lors d'une tâche, chez les personnes âgées. En effet, chez les personnes plus âgées, les réseaux par défaut antérieurs sont davantage désactivés que chez les plus jeunes, tandis que les réseaux par défaut postérieurs le sont moins (Davis et al., 2008).

Il a été démontré que le phénomène PASA n'est pas lié à un effet de difficulté de la tâche chez les personnes âgées (Davis et al., 2008). Un tel effet est observé lorsqu'une même tâche est plus difficile pour les personnes âgées que pour les plus jeunes et qu'elle entraîne ainsi une activation cérébrale plus grande chez les plus âgés. Dans l'étude de Davis et al. (2008), les participants jeunes et âgés ont été jumelés en fonction de leurs réponses et de leur niveau de confiance face à leurs réponses. Ainsi, les jeunes et les adultes âgés furent comparés sur la base de performances équivalentes éliminant de cette façon l'effet de difficulté chez les personnes âgées. Dans ces conditions, l'activité occipitale était tout de même plus élevée chez les jeunes que chez les personnes âgées, tandis que l'activité frontale était plus élevée chez les personnes âgées que chez les jeunes (Davis et al., 2008). Il faut cependant noter que les temps de réactions étaient tout de même plus longs chez les personnes âgées (Davis et al., 2008). Ce temps de réaction plus long pourrait être le signe que les réseaux alternatifs mis de l'avant dans le modèle PASA seraient moins efficaces, en termes de temps et possiblement d'énergie, que les réseaux activés chez les

jeunes (Grady et al., 1994). Cette étude confirme ainsi que le phénomène PASA permet de compenser les effets du vieillissement et non de compenser pour un effet de difficulté d'une tâche.

L'ampleur du phénomène PASA pourrait cependant être dépendante de la charge attentionnelle requise pour effectuer une tâche (Ansado et al., 2012). Bien que l'étude d'Ansado et al. (2012) constate déjà la présence d'un phénomène PASA lors d'une tâche d'attention sélective visuelle de faible charge attentionnelle, ce phénomène s'amplifie lorsque la charge attentionnelle augmente. Ainsi, lorsque la charge attentionnelle nécessaire est élevée, une augmentation de l'activité et une extension du recrutement sont observées dans les régions du cortex frontal, latéral et médial chez les participants âgés tandis qu'une augmentation de l'activité est observée dans les régions du cortex pariétal et occipital chez les participants plus jeunes (Ansado et al., 2012). Les exigences attentionnelles ont donc pour effet d'amplifier le phénomène PASA en accentuant les différences d'activation entre les jeunes et les âgés.

Les études ayant démontré le phénomène PASA utilisaient des cohortes de participants hautement scolarisés et ayant de bonnes performances cognitives (Davis et al., 2008). Il n'est donc pas possible de savoir si ce modèle se généralise à d'autres types de personnes âgées, notamment celles qui manifestent de moins bonnes performances cognitives.

Une revue de littérature menée par Eyler et al. (2011) révèle que plusieurs études de neuroimagerie décrivent une évolution des patrons d'activation s'apparentant aux modèles HAROLD et PASA. Dans la majorité des cas, ces changements observés dans le vieillissement étaient davantage associés à des effets bénéfiques sur la cognition qu'à une dégradation des performances (Eyler et al., 2011).

Bref, le modèle PASA consiste en une réorganisation cérébrale intra-hémisphérique compensatoire où les personnes âgées démontrent une augmentation de l'activité cérébrale dans les régions antérieures et une diminution de l'activité cérébrale dans les régions postérieures par rapport aux plus jeunes.

2.3. Le modèle CRUNCH

L'hypothèse de l'utilisation compensatoire de circuits neuronaux ou modèle CRUNCH (*Compensation-Related Utilization of Neural Circuits Hypothesis*) stipule que la suractivation souvent observée chez les personnes âgées serait un mécanisme de compensation (Reuter-Lorenz et Cappell, 2008). Cette suractivation peut se présenter sous la forme d'activation de régions supplémentaires ou simplement sous la forme d'une activation plus importante de la région activée chez les plus jeunes. Dans les deux cas, cette suractivation serait une réponse à un besoin de compensation créé par la dégradation avec

l'âge du substrat neuronal (Reuter-Lorenz et Cappell, 2008). Cette suractivation serait nécessaire afin de maintenir des performances comparables aux plus jeunes, mais elle ne serait pas toujours suffisante. Ainsi, il arrive, chez certains participants, qu'une suractivation d'une région neuronale soit couplée à une mauvaise performance à un test cognitif (Reuter-Lorenz et Cappell, 2008). Par contre, cette suractivation demeure tout de même bénéfique chez une majorité de participants et dans une grande variété de tâches cognitives (Reuter-Lorenz et Cappell, 2008).

La suractivation observée chez les participants plus âgés serait, selon le modèle CRUNCH, due au fait que les régions cérébrales impliquées doivent travailler plus fort chez ces derniers que chez les plus jeunes ou que plus de régions soient nécessaires pour effectuer la tâche (Reuter-Lorenz et Cappell, 2008). Ce plus grand travail serait possiblement causé par le fait qu'ils doivent compenser des déclin fonctionnels situés ailleurs en amont dans le processus cognitif (Reuter-Lorenz et Cappell, 2008). Il en résulterait une dégradation de la qualité de l'information transmise aux régions subséquentes effectuant la tâche, rendant cette dernière plus difficile et une suractivité des régions en aval. Une autre explication possible, toujours selon le modèle CRUNCH, serait que cette suractivation soit due au déclin de la précision des processus perceptifs entraînant plus de bruits, ou d'interférences, lors du traitement cognitif ce qui a pour effet d'augmenter la charge de travail (Reuter-Lorenz et Cappell, 2008).

Le modèle CRUNCH statue que l'inefficacité des processus cognitifs chez les personnes âgées entraînerait le recrutement de ressources neuronales additionnelles afin de préserver un bon niveau de performance (Reuter-Lorenz et Cappell, 2008). Même lorsque les tâches cognitives effectuées par les personnes âgées sont faciles, une suractivation des régions activées chez les plus jeunes est souvent observée (Reuter-Lorenz et Cappell, 2008). Lorsque les tâches deviennent plus difficiles, d'autres régions semblent venir soutenir le travail des régions normalement dédiées aux tâches en question. Le cortex préfrontal, plus particulièrement le cortex préfrontal dorsolatéral, serait une région sollicitée lorsque la tâche est difficile chez les plus jeunes. Cette région est également souvent sollicitée chez les plus âgés, et ce à des niveaux de difficulté moindre des tâches que chez les jeunes (Cappell et al., 2010). Le cortex préfrontal dorsolatéral jouerait donc possiblement un rôle de compensation chez les personnes plus âgées, car pour elles une tâche en apparence plus facile demanderait tout de même un grand effort cognitif (Reuter-Lorenz et Cappell, 2008). Le cortex préfrontal serait un site naturel de compensation, servant tant chez les jeunes que chez les plus âgés lorsqu'une tâche devient exigeante pour leur capacité respective. Cela expliquerait son recrutement fréquent chez les plus âgés. Chez les personnes âgées, lorsque les tâches sont plus difficiles, la distinction entre les régions activées lors de différentes tâches diminuerait (Carp et al., 2010). Si cette diminution s'expliquait uniquement par une dédifférenciation des régions cérébrales, elle serait également observable lorsque les tâches sont plus faciles. Cette

diminution s'explique donc également par la suractivation de plusieurs régions de soutien, qui seraient communes à plusieurs tâches lorsqu'elles deviennent plus difficiles, dans le but de compenser le vieillissement cognitif tel que décrit par le modèle CRUNCH (Carp et al., 2010).

Cependant, lorsque la tâche devient trop difficile, les ressources neuronales atteignent une limite menant à un traitement cognitif inefficace et à un déclin dans le niveau des performances (Reuter-Lorenz et Cappell, 2008). Par exemple, lors d'une tâche de mémoire de travail, il a été observé que les personnes âgées recrutaient davantage de ressources neuronales même si la charge était faible, ainsi ils n'avaient plus de ressources additionnelles pouvant être recrutées lorsque la charge augmentait, contrairement aux plus jeunes, ce qui résultait en une diminution de leur performance (Schneider-Garces et al., 2010, Cappell et al., 2010).

Le modèle CRUNCH propose un cadre de réorganisation cérébrale chez les personnes âgées plus général que les modèles HAROLD et PASA. Ainsi, il permet de tenir compte d'une plus grande variété d'observations faites chez ces derniers. Le modèle HAROLD pourrait être considéré, sous un certain angle, comme un cas particulier pouvant s'inscrire dans le modèle CRUNCH puisqu'il décrit l'activation d'une région supplémentaire afin de compenser la dégradation neuronale liée au vieillissement (Berlingeri et al., 2013).

Bref, le modèle CRUNCH décrit plusieurs formes de suractivation cérébrale chez les personnes plus âgées. Cette suractivation de certaines régions serait en fait un mécanisme de compensation ayant pour but de maintenir un niveau adéquat de performance, et ce même lorsqu'aucun nouveau réseau n'est recruté.

2.4. La théorie de la réserve cognitive

La théorie de la réserve cognitive décrit la capacité du cerveau de minimiser parfois les manifestations cliniques liées aux lésions cérébrales qu'il a subies (Stern, 2002, Sole-Padullès et al., 2009). Elle témoigne de la discordance, observée chez certains patients, entre la gravité des dommages occasionnés au cerveau lors d'un traumatisme ou d'une maladie et leurs manifestations cliniques (Stern, 2009). Ainsi, deux patients ayant des lésions cérébrales semblables pourraient avoir des niveaux d'atteinte cognitive tout à fait différents. Chez des patients souffrant de la maladie d'Alzheimer, mais ayant une petite réserve cognitive, un déclin des performances cognitives progressant lentement est observé assez tôt. Par contre, le déclin des performances cognitives chez un patient ayant une grande réserve cognitive n'est observé que tardivement, mais ce déclin est plus rapide (Stern, 2009, Stern, 2002).

Une étude en neuroimagerie, chez des participants sans démence, a démontré que les adultes âgés ayant une plus grande réserve cognitive réussissaient mieux une batterie de tests cognitifs, malgré de grandes quantités de matière blanche hyperintense, réputées affecter les fonctions cognitives, que ceux ayant une plus petite réserve (Brickman et al., 2009). Lors d'autopsies, il a également été possible d'observer de nombreuses marques de la maladie d'Alzheimer dans le cerveau des personnes qui ne présentaient pourtant aucun symptôme clinique de démence (Sole-Padullles et al., 2009). La réserve cognitive jouerait également un rôle dans le vieillissement normal et pourrait expliquer la très grande variabilité des performances cognitives observée entre les personnes âgées (Stern, 2009).

Selon Stern (2009), la réserve cognitive ne serait pas un phénomène spécifique à quelques fonctions ou tâches cognitives, mais bien un processus pouvant s'étendre potentiellement à l'ensemble du cerveau. Elle permettrait donc aux personnes âgées de maintenir des fonctions cognitives optimales plus longtemps dans une grande variété de tâches. De plus, la réserve cognitive ne serait pas exclusive au vieillissement ou aux cas d'atteintes neuropathologiques. En effet, chez les jeunes adultes, une grande réserve cognitive serait associée à une meilleure efficacité des réseaux cognitifs, donc à de bonnes performances couplées à une moins grande activité cérébrale (Stern, 2009).

Deux types de réserve pourraient expliquer les discordances décrites plus tôt et la variabilité observée entre les individus : une réserve cérébrale et une réserve cognitive. Le premier type décrit une réserve cérébrale comportant un mécanisme plutôt passif et référant principalement aux aspects structurels du cerveau (Stern, 2009, Jones et al., 2010). Selon le modèle de la réserve cérébrale, des différences entre les individus au niveau du cerveau lui-même permettent à certaines personnes de mieux pallier le déclin cognitif (Stern, 2009). Ainsi, les composantes de la réserve cérébrale seraient notamment la grosseur du cerveau, le nombre de neurones et le nombre de synapses (Stern, 2009). En plus de ces prédispositions innées, l'expérience de vie de chaque individu pourrait influencer la réserve cérébrale, notamment via la stimulation de la neurogénèse, de l'angiogénèse (développement de nouveaux vaisseaux sanguins), de la plasticité neuronale et de la résistance à l'apoptose (mort cellulaire programmée) (Stern, 2009). Dans le modèle de la réserve cérébrale, les manifestations cliniques subviennent lorsqu'un seuil de résistance aux dommages cérébraux, variant d'un individu à l'autre, est dépassé (Stern, 2009, Stern, 2002). Ainsi, dans le cas de la réserve cérébrale, la variabilité observée entre les individus s'explique simplement par le fait que chaque individu possède un seuil différent et fixe de résistance aux dommages cérébraux déterminé par les caractéristiques du cerveau. Bref, la réserve cérébrale correspondant principalement aux aspects anatomophysiologiques du cerveau qui permettent de ralentir les déficits cognitifs et les manifestations cliniques de certaines neuropathologies.

Le second type décrit une réserve cognitive comportant un mécanisme plutôt actif et référant aux processus de compensation des réseaux cognitifs (Stern, 2009, Jones et al., 2010). Selon le modèle de la réserve cognitive, des différences entre les individus sur leur façon de traiter différentes tâches cognitives, notamment par les réseaux neuronaux utilisés, permettent à certaines personnes de mieux pallier le déclin cognitif (Stern, 2009, Stern, 2002). La réserve cognitive se divise en deux composantes principales : la réserve neurale et la compensation neurale. D'abord, la réserve neurale, principalement chez les personnes en santé, réfère à la flexibilité, la capacité et l'efficacité des réseaux neuronaux pour effectuer des tâches cognitives (Stern, 2009). Ainsi, les individus possédant des réseaux neuronaux plus flexibles, plus efficaces et possédant une plus grande capacité de réserve seraient mieux outillés pour faire face à d'éventuelles atteintes cérébrales. Ensuite, la compensation neurale réfère à la capacité de certains individus à compenser pour les atteintes neuropathologiques à un réseau normalement utilisé pour une tâche par l'utilisation de nouveaux réseaux qui ne sont habituellement pas impliqués dans cette tâche (Stern, 2009). Il s'agit donc d'un mécanisme actif qui est déclenché par l'atteinte et qui permet de maintenir de bonnes performances au niveau cognitif. Ce modèle actif de réserve cognitive ne prend pas en considération le concept de seuil fixe de dommage cérébral, mais bien les processus nécessaires à la compensation. Ainsi, le déclin cognitif ne s'accentuerait qu'au moment où cette capacité de compensation serait épuisée ou non suffisante.

Il faut cependant noter que la démarcation réelle entre la réserve cérébrale et la réserve cognitive n'est pas très claire et qu'il est assez probable que la réserve cérébrale soit l'une des bases de la réserve cognitive (Stern, 2009). De plus, les facteurs pouvant promouvoir une plus grande réserve, comme le niveau de scolarité ou la profession, sont les mêmes pour les deux types décrits, rendant leur dissociation encore moins évidente (Stern, 2009). Il est possible de mesurer la grandeur de la réserve cérébrale via des données comme le volume du cerveau ou le nombre de synapses (Stern, 2009). Par contre, il est impossible de mesurer directement la réserve cognitive puisqu'elle dépend de l'utilisation ou non de réseaux alternatifs. Il est cependant possible d'estimer la grandeur de la réserve cognitive d'une personne en mesurant différents facteurs comme : le quotient intellectuel, le niveau de scolarité, la profession, les activités intellectuelles et les activités sociales (Sole-Padulles et al., 2009).

Bref, cette théorie explique que la discordance observée entre les atteintes cérébrales et les capacités cognitives chez certains patients est due au fait que les personnes possédant une plus grande réserve cognitive sont mieux outillées pour pallier les déclinés normalement liés aux atteintes cérébrales. Ces personnes possèdent des réseaux neuronaux plus efficaces et sont plus aptes à utiliser des réseaux alternatifs lors de lésions cérébrales.

2.5. La théorie de l'échafaudage cognitif

L'échafaudage cognitif (*Scaffolding Theory of Aging and Cognition*) est une théorie qui vise à expliquer de quelle façon les personnes âgées parviennent à maintenir un niveau cognitif respectable malgré les importants changements aux niveaux neuronal et structurel accompagnant le vieillissement. L'échafaudage cognitif aurait lieu tout au long de la vie et ne serait pas une réponse au vieillissement, mais bien une réponse aux défis que doit relever le cerveau pour s'adapter à son environnement (Park et Reuter-Lorenz, 2009). Ainsi, cette théorie pourrait s'appliquer autant à l'acquisition de nouvelles compétences, comme l'apprentissage d'un instrument de musique chez les plus jeunes qu'au défi naturel qu'est le vieillissement.

Selon cette théorie, lorsqu'un défi cognitif se présente, le cerveau activera également des circuits secondaires qui serviront de soutien, ou d'échafaudage, aux circuits habituellement spécifiques à la tâche (Park et Reuter-Lorenz, 2009). Dans le cas d'un apprentissage, l'activation de ces circuits secondaires diminuera au fur et à mesure que le nouvel apprentissage est maîtrisé et que le développement de la région spécifique est optimisé pour la tâche, ne nécessitant plus de soutien. Cependant, ces circuits secondaires demeurent disponibles et seraient parmi ceux qui seront recrutés lorsqu'un nouveau défi se présente (Park et Reuter-Lorenz, 2009). Le recrutement de réseaux de soutien servant d'échafaudage serait également possible lorsque la

tâche est réalisée dans des conditions environnementales difficiles, par exemple lorsqu'une tâche est réalisée sous pression (Cooper et al., 2013).

Le vieillissement normal occasionne plusieurs détériorations fonctionnelles et neuronales représentant un défi pour le cerveau. Ces obstacles sont surmontés par divers processus constituant un échafaudage compensatoire permettant de maintenir un certain niveau de fonctionnement cognitif (Park et Reuter-Lorenz, 2009). Les principaux processus cités seraient l'augmentation du recrutement des régions frontales (à la manière du modèle PASA), la neurogénèse, la plus grande distribution des processus et l'augmentation de la bilatéralité (à la manière du modèle HAROLD) (Park et Reuter-Lorenz, 2009). L'échafaudage cognitif serait donc un constituant important du vieillissement sain et optimal (Park et Reuter-Lorenz, 2009).

Les personnes maintenant de grandes capacités cognitives lors du vieillissement seraient celles qui possèdent également de grandes capacités à générer des échafaudages cognitifs (Park et Reuter-Lorenz, 2009). Le cortex préfrontal, grâce à sa grande versatilité, serait la principale région responsable de l'échafaudage cognitif dans le contexte du vieillissement (Park et Reuter-Lorenz, 2009). Le cortex préfrontal dorsolatéral serait particulièrement impliqué, même à de bas niveaux de difficulté, démontrant son importance dans la compensation nécessitée par le vieillissement. Il faut cependant noter que ces réseaux de soutien demeurent moins efficaces que les réseaux traditionnels et

qu'ils ne permettent pas toujours de maintenir une efficacité cognitive complète (Park et Reuter-Lorenz, 2009). Il y a également une limite quant à la quantité de réseaux alternatifs pouvant être recrutés. Ainsi, il a été observé que lors d'une tâche sous pression, il était impossible pour les plus âgés, contrairement aux plus jeunes, de recruter de nouveaux réseaux, car ils avaient déjà été recrutés pour effectuer la tâche sans pression (Cooper et al., 2013).

Toujours selon Park et Reuter-Lorenz (2009), les réseaux d'échafaudage associés aux fonctions utilisées quotidiennement tout au long de la vie, comme les fonctions langagières, seraient les plus développés permettant une meilleure et plus durable préservation. Il en serait de même des fonctions davantage stimulées lors d'un entraînement cognitif ou lorsqu'il s'agit d'un champ d'expertise de la personne, comme de jouer du piano pour un pianiste. En fait, l'entraînement cognitif et les expériences de vie stimulantes seraient possiblement des moyens efficaces de promouvoir l'échafaudage cognitif chez les personnes âgées (Park et Reuter-Lorenz, 2009). Par contre, l'entraînement cognitif semble surtout donner des résultats sur la tâche entraînée et très peu sur d'autres types de tâches similaires (Park et Bischof, 2013). Les résultats obtenus seraient plus intéressants lorsque l'entraînement cognitif est remplacé par une activité de loisir exigeante sur plusieurs processus cognitifs (Park et Bischof, 2013). De plus, l'intérêt de la personne est plus grand pour un loisir que pour une tâche d'entraînement, permettant ainsi un plus grand plaisir et

subséquemment une plus grande motivation à poursuivre l'entraînement sur de longues périodes.

À l'inverse, les atteintes neuropathologiques, comme celles survenant lors de la maladie d'Alzheimer, affectent l'échafaudage et les structures qu'il soutient. Lorsque ces atteintes deviennent trop importantes, l'échafaudage s'écroule menant à une accélération du déclin cognitif (Park et Reuter-Lorenz, 2009).

L'ampleur de la réserve cognitive de chaque individu pourrait être un des déterminants principaux de la capacité, de la qualité, de la quantité et de l'efficacité de son échafaudage cognitif (Park et Reuter-Lorenz, 2009). De plus, tant la réserve cognitive que l'échafaudage cognitif décrivent l'utilisation de circuits alternatifs afin de compenser les pertes dues au vieillissement et maintenir un niveau de cognition acceptable.

Bref, l'échafaudage cognitif est une réponse au défi que représente le vieillissement pour le cerveau. Cette théorie décrit en fait l'activation de circuits supplémentaires permettant de soutenir les circuits normalement dédiés à une tâche donnée afin de maintenir leur efficacité et de compenser la dégradation des structures neuronales qui y sont associées.

2.6. Les facteurs influençant la plasticité cérébrale et le maintien des fonctions cognitives

La plasticité cérébrale varie, principalement dans son ampleur, d'une personne à l'autre. Cette variabilité entre les individus fait en sorte que certains sont mieux protégés face au déclin observé lors du vieillissement tandis que d'autres sont plus vulnérables. Plusieurs facteurs semblent influencer la plasticité cérébrale et ainsi favoriser le maintien d'une bonne cognition malgré un âge avancé. La théorie de la réserve cognitive est celle qui traite davantage de ces facteurs, bien que ces facteurs puissent s'appliquer à tous les modèles décrits précédemment. Les auteurs de la théorie de l'échafaudage cognitif mentionnent d'ailleurs que les facteurs influençant leur modèle seraient les mêmes que ceux influençant la réserve cognitive (Park et Reuter-Lorenz, 2009). L'ampleur de la réserve cognitive d'un individu serait principalement liée à son niveau de scolarité, son type de profession, ses activités de loisir, les activités stimulant la cognition, son quotient intellectuel et son niveau d'activité physique (Stern, 2002, Sole-Padullès et al., 2009, Jones et al., 2010). Selon certains, l'éducation et la profession seraient les deux principaux facteurs influençant les capacités de la réserve cognitive (Staff et al., 2004).

Les individus hautement scolarisés maintiendraient plus longtemps de meilleures capacités cognitives (Stern, 2002, Ardila et al., 2000). Chez les personnes âgées, le niveau d'éducation serait lié à plusieurs fonctions

cognitives, comme les fonctions intellectuelles verbales, les fonctions langagières, la mémoire visuelle, la mémoire logique et le calcul (Ylikoski et al., 1998). Cependant, le niveau d'éducation serait peu lié à la vitesse de traitement et au temps de réaction (Christensen et al., 1997). Dans le domaine de la compréhension du discours, un niveau de scolarité supérieur au niveau secondaire conférerait un avantage chez les plus âgés en ce qui a trait au traitement des métaphores et des inférences (Mackenzie, 2000).

Le niveau de scolarité serait le facteur ayant le plus grand impact sur les capacités de réserve cognitive des individus. L'éducation pourrait influencer la réserve cognitive en promouvant la croissance synaptique ou en favorisant le développement de nouvelles stratégies cognitives (Jones et al., 2010). Il est également rapporté que les personnes âgées ayant un haut niveau de scolarité recruteraient davantage les régions frontales que les personnes âgées moins scolarisées et que les plus jeunes hautement scolarisés (Springer et al., 2005). Cette différence démontre bien l'influence que l'éducation semble avoir sur la réorganisation cérébrale. L'éducation permettrait une plus grande compensation lors de lésions cérébrales ou de maladies neurodégénératives, mais elle n'aurait pas un effet protecteur face à ces maladies (Christensen et al., 1997).

Le fait d'avoir une profession demandant davantage de réflexion, de planification et de prises de décisions aurait un plus grand effet protecteur sur la cognition que d'avoir une profession strictement manuelle ou avec des gestes

répétitifs (Jones et al., 2010). Il est assez difficile de séparer l'éducation et la profession, puisque plusieurs professions dites complexes nécessitent un haut niveau de scolarité. Malgré tout, une profession complexe permet probablement d'améliorer et de maintenir plus facilement, tout au long de la vie, les habiletés cognitives qui seraient davantage sollicitées dans ce type de travail (Jones et al., 2010). Par contre, il se pourrait également que les emplois complexes et la capacité d'atteindre un haut niveau de scolarité, soit en fait les reflets de prédispositions cérébrales ou d'aptitudes cognitives meilleures au départ et que la possibilité d'accomplir ce type d'emploi ou de scolarité s'explique par une plus grande réserve cognitive à la naissance et non l'inverse (Jones et al., 2010). Un quotient intellectuel élevé est souvent associé à une plus grande réserve cognitive. Par contre, comme le quotient intellectuel dépend des capacités cérébrales de l'individu et qu'il est souvent lié à la qualité de l'éducation reçue, il est difficile de déterminer son rôle dans l'élaboration de la réserve cognitive (Jones et al., 2010).

Les loisirs stimulant la cognition, par exemple, la lecture, l'écriture, les casse-têtes, les jeux de type mots-croisés, les jeux de société ou assister à des conférences, permettraient de maintenir de meilleures fonctions cognitives lors du vieillissement (Lachman et al., 2010). Les loisirs et les activités stimulant la cognition auraient un effet protecteur, diminuant l'atrophie de certaines régions du cerveau, et ce, même si ces activités ne sont débutées qu'à un âge avancé (Jones et al., 2010). Une étude montre également que la réalisation fréquente,

au moins une fois par semaine, d'activités stimulant la cognition permettrait à des personnes moins scolarisées d'obtenir des résultats à des tests de mémoire épisodique quasi aussi bons que ceux obtenus par des personnes hautement scolarisées (Lachman et al., 2010). Des activités stimulant la cognition compenseraient donc possiblement un niveau de scolarité moins élevé. Les personnes hautement scolarisées sont cependant plus susceptibles de prendre part à des activités et loisirs stimulant la cognition (Lachman et al., 2010).

La lecture est un loisir stimulant la cognition particulièrement intéressant dans le cadre de cette thèse puisqu'elle est directement liée à la compréhension du discours écrit. La lecture contribue au développement cognitif dès l'enfance et au maintien de cette cognition tout au long de la vie (Parente et al., 2008). Maintenir de bonnes habitudes de lecture au cours de la vie aurait un effet protecteur face au déclin cognitif lié au vieillissement et face à certaines démences (Parente et al., 2008, Esteve et Gil, 2013). Cet effet protecteur serait même plus important chez les personnes maintenant des habitudes fréquentes de lecture (Esteve et Gil, 2013).

L'activité physique pourrait également influencer l'amplitude de la réserve cognitive. En fait, l'activité physique pourrait agir indirectement en améliorant la santé cardiovasculaire de la personne, ce qui a pour effet d'améliorer l'oxygénation du cerveau et de réduire les risques d'accidents

vasculaires cérébraux permettant ainsi de maintenir la santé globale du cerveau plus longtemps (Jones et al., 2010).

Bref, plusieurs facteurs peuvent contribuer au maintien des fonctions cognitives et possiblement à la plasticité cérébrale. L'éducation, l'occupation professionnelle et les loisirs stimulant la cognition, comme la lecture, semblent être parmi les principaux facteurs. Cependant, ces facteurs sont difficiles à dissocier puisque les personnes hautement scolarisées sont également celles qui sont le plus susceptibles d'occuper une profession et de réaliser des loisirs stimulant la cognition.

3. Compréhension du discours

Le discours, sous sa forme orale ou écrite, est à la base de la communication chez l'homme. La compréhension du discours écrit, bien qu'étant un automatisme lié à la lecture, est une tâche cognitive complexe (Kintsch et van Dijk, 1978). Il existe quelques modèles cognitifs tentant d'expliquer les processus d'analyse nécessaires à la compréhension du discours. Le modèle le plus complet, et le plus adapté aux besoins de cette thèse, est le modèle de Kintsch (Kintsch, 1988). Ce modèle intègre notamment la forme, le contenu et le contexte du texte (Chesneau et al., 2007b).

3.1. Les niveaux de compréhension du texte

Le modèle de construction-intégration de Kintsch distingue quatre niveaux de représentation dans le traitement du texte : le texte de surface, la base du texte, le modèle de situation et la superstructure (Kintsch, 1988).

Texte de surface

Le texte de surface correspond aux composantes linguistiques du discours, notamment son vocabulaire, sa grammaire et sa syntaxe, mais aussi ses aspects phonologiques (organisation des sons d'une langue) et morphologiques (le type et la forme des mots) (Ska et Duong, 2005). Le texte de surface fournit donc les données brutes du texte qui seront traitées lors du processus d'intégration en vue de sa compréhension. La validation de la cohésion du texte se fait également à ce niveau, entre autres via l'analyse de l'utilisation des référents, comme les pronoms (Ska et Duong, 2005). Ce niveau ne s'attarde donc pas au contenu du texte, mais bien à sa forme linguistique (Chesneau et al., 2007b). Ainsi, ce niveau de compréhension est le premier dans le processus de traitement de l'information. Il permet la construction des propositions qui feront leur entrée dans les cycles de compréhension (voir plus loin). Bref, le traitement du texte de surface correspond au traitement des aspects linguistiques et de la cohésion du texte. Le traitement du texte de surface suivra donc les mêmes règles peu importe le type de discours, la

longueur du discours, la charge sémantique du discours ou le contexte du discours.

Base du texte

La base du texte constitue l'ensemble des propositions ou unités d'informations sémantiques. Une proposition se compose d'un prédicat en relation avec un ou plusieurs arguments (Chesneau, 2007). Les prédicats et arguments sont des concepts pouvant englober un ou plusieurs mots. Dans une proposition sémantique, le prédicat désigne un état, une propriété ou une relation, il sert donc à qualifier ou relier (Le Ny, 1979, Duong, 2002). De leur côté, les arguments désignent les personnes, les lieux ou les objets à qui s'appliquent la qualité ou la relation (Le Ny, 1979, Duong, 2002). Par exemple, dans la phrase « Stéphanie enseigne la biologie. », ENSEIGNER est le prédicat qui relie les arguments STÉPHANIE et BIOLOGIE. Dans la phrase « Montréal est une île. », ÎLE est le prédicat qui qualifie l'argument MONTRÉAL. Par convention, les propositions sémantiques sont indiquées comme suit : PRÉDICAT (ARGUMENT 1, ARGUMENT 2) (Le Ny, 1979), par exemple, ENSEIGNER (STÉPHANIE, BIOLOGIE). Puisque l'analyse de la cohésion des référents se fait au niveau de la structure de surface (Ska et Duong, 2005), seul l'argument principal désignant un objet ou une personne sera conservé pour la prédication. Si l'exemple « Stéphanie enseigne la biologie. » est repris, STÉPHANIE sera l'argument conservé tout au long de l'analyse, même si des

référents tel que : « elle », « la fille du comptable » ou « cette dernière » sont utilisés pour la désigner dans la suite du texte.

La base du texte est une entité structurée et cohérente et non une simple liste de propositions (Kintsch et van Dijk, 1978). Lors de ce niveau de représentation, un traitement cognitif est nécessaire afin de bâtir une représentation propositionnelle des phrases présentées dans le texte (Denhière et Baudet, 1992). Dans le contexte du modèle de construction-intégration de Kintsch, il faut distinguer deux types de proposition. D'abord, les micropropositions qui expriment tous les détails du texte reflétant ainsi l'information locale de ce dernier. Puis, les macropropositions qui expriment l'information globale du texte.

Base du texte : Micropropositions

La microstructure (ensemble de micropropositions) comprend toutes les propositions du texte. Cependant, il y est davantage question d'un réseau hiérarchique complexe que d'une liste de propositions (Kintsch et van Dijk, 1978). Lorsque deux propositions possèdent un argument commun, elles sont reliées. Ces liens seraient une des bases de la cohérence locale de la microstructure (Denhière et Baudet, 1992). Ce chevauchement d'argument entraîne également une hiérarchisation des propositions (Denhière et Baudet, 1992). Au sommet, se trouvent les propositions les plus importantes (qui seront

souvent celles maintenues par les macrorègles dans les traitements subséquents). Toutes les propositions liées à ces propositions les plus importantes, via le chevauchement d'argument formeront le niveau suivant, celles liées à ce second niveau formeront le prochain niveau et ainsi de suite (Denhière et Baudet, 1992). Dans l'exemple « Jean-Sébastien joue de la guitare électrique. », la proposition sémantique JOUER (JEAN-SÉBASTIEN, GUITARE) serait au sommet, tandis que la proposition sémantique ÉLECTRIQUE (GUITARE) serait liée à la première proposition, mais occuperait un niveau inférieur secondaire et moins important. Certaines connaissances linguistiques et certaines connaissances du domaine du texte (par exemple : habiller et vêtement ont un lien sémantique établi par une connaissance générale) peuvent également contribuer à la cohésion du réseau microstructurale (Denhière et Baudet, 1992). En résumé, la microstructure est l'étape de la compréhension du discours où s'assemblent les propositions sémantiques présentes dans le texte et les inférences nécessaires pour assurer la cohérence et la hiérarchisation de ce réseau.

Base du texte : Macropropositions

La macrostructure (ensemble de macropropositions) vise à identifier les idées les plus importantes du texte. Tout comme les micropropositions, les macropropositions sont reliées entre elles et organisées hiérarchiquement (Denhière et Baudet, 1992). Les macropropositions sont dérivées des

micropropositions suivant trois règles visant à généraliser et cerner l'essentiel de l'information exprimée par les micropropositions. Ces trois règles, ou macrorègles, sont les suivantes (Kintsch et van Dijk, 1978, Chesneau et al., 2007b, Denhière et Baudet, 1992) :

1. **Délétion** : Suppression de chaque proposition qui n'est pas une condition directe ou indirecte à l'interprétation d'une proposition subséquente (Kintsch et van Dijk, 1978). Cette règle permet donc d'élaguer le discours de ces éléments superflus ou répétitifs. Par exemple :

De la phrase « Marc-Antoine répare une vieille radio verte. », on retiendrait : « Marc-Antoine répare une radio. ».

Les trois micropropositions initiales, RÉPARER (MARC-ANTOINE, RADIO); VIEILLE (RADIO); VERTE (RADIO), sont réduites à une seule : RÉPARER (MARC-ANTOINE, RADIO).

2. **Généralisation** : Remplacement d'une séquence de propositions par une seule macroproposition référant au concept supérieur qui comprend ces dernières (ex : chien ou chat référant au concept d'animal domestique) ou, en d'autres mots, par une proposition qui inclut chacune des propositions de la séquence (Kintsch et van Dijk, 1978, Denhière et Baudet, 1992). Cette règle permet souvent de généraliser l'idée en diminuant la précision de l'information retenue. Par exemple :

La phrase « Linda coupe des pommes, des poires et des oranges. » est généralisée à « Linda coupe des fruits. ».

Les trois micropropositions initiales, COUPER (LINDA, POMMES); COUPER (LINDA, POIRES); COUPER (LINDA, ORANGES), deviennent : COUPER (LINDA, FRUITS).

3. **Construction** : Remplacement d'une séquence de propositions par une seule macroproposition réunissant la description de plusieurs ou qui en est une cause ou une conséquence particulière, en d'autres mots, remplacer la séquence par une proposition dénotant un fait global dont les faits exprimés par les propositions de la séquence sont des conditions, des composants ou des conséquences normales (Kintsch et van Dijk, 1978, Denhière et Baudet, 1992). Cette règle permet donc de créer une nouvelle proposition, absente du texte, qui résume une séquence de propositions présentes dans le texte.

La phrase « Jacques paie son entrée, achète un maïs soufflé, s'assoit dans une salle et attend que le film commence. » est remplacé par : « Jacques fait une sortie au cinéma. ».

Les quatre micropropositions initiales, PAYER (JACQUES, ENTRÉE); ACHETER (JACQUES, MAÏS SOUFFLÉ); ASSEOIR (JACQUES, SALLE); ATTENDRE (JACQUES, FILM), sont remplacées par : FAIRE (JACQUES, SORTIE AU CINÉMA).

Le but de ces macrorègles est de réduire et organiser l'information de la base du texte (Denhière et Baudet, 1992). Par contre, elles doivent permettre la préservation de la signification du texte, par exemple, aucune proposition ne peut être supprimée si elle est nécessaire à l'interprétation d'une autre proposition. Ces macrorègles peuvent également être appliquées à une séquence de macropropositions afin d'élaborer une macrostructure de niveau supérieur (Denhière et Baudet, 1992).

Modèle de situation

Le discours porte sur des représentations de personnes, d'objets ou d'évènements, il porte donc sur un fragment du monde qu'on appelle dans le domaine linguistique une situation (Van Dijk, 1987, Denhière et Baudet, 1992). Le modèle de situation est l'équivalent cognitif du concept de situation, c'est-à-dire ce que les lecteurs ont en tête, ou s'imagine, lorsqu'ils lisent ou entendent un discours référant à cette situation (Van Dijk, 1987, Denhière et Baudet, 1992).

Alors que la base du texte correspondant davantage à la représentation propositionnelle du texte, le modèle de situation est une représentation du discours s'intégrant aux connaissances de l'individu (Kintsch, 1988). Il se construit à partir du texte et des connaissances du monde (Chesneau et al., 2007b). Même si, la base du texte permet déjà d'expliquer les capacités de

rappel libre d'informations du lecteur, le modèle de situation est essentiel pour expliquer sa capacité d'inférence en fournissant les informations nécessaires à cette dernière (Perrig et Kintsch, 1985). Par exemple, grâce au modèle de situation construit à partir de la phrase : « Ben a toussé toute la nuit. », il est possible d'inférer que : « Ben est malade. ». Cela peut s'expliquer en partie par le fait que le modèle de situation ne représente pas le texte lui-même, mais bien les sujets et les évènements qui y sont décrits (Radvansky et al., 2001).

À ce niveau, les connaissances du lecteur, ses expériences personnelles, son savoir social, ses émotions, ses croyances et ses opinions sont mises en relation avec le modèle de situation construit afin de dégager une interprétation personnelle du texte (Radvansky, 1999b, Denhière et Baudet, 1992). En fait, les connaissances générales, que ce soit les mots, la syntaxe, les faits historiques ou sur la nature, etc., contraignent la construction du modèle de situation et pourraient même influencer l'élaboration du réseau prépositionnel de la base du texte via la relation entre cette dernière et le modèle de situation (Kintsch, 1988). Il en résulte que le modèle de situation est une représentation mentale qui peut être incomplète en fonction du niveau de connaissance de l'individu sur le sujet du discours (Radvansky et Dijkstra, 2007).

Chaque modèle de situation correspond à une situation limitée dans le temps (moment où se situe l'évènement) et dans l'espace (endroit où se situe l'évènement) et contenant des personnages (humains ou animaux), des objets

ou des idées (Radvansky et Dijkstra, 2007). Les évènements ayant lieu au même endroit et au même moment peuvent faire partie de la même situation, tandis que les évènements ayant lieu dans des endroits ou à des temps différents seront traités comme des situations différentes (Radvansky et Dijkstra, 2007). Par exemple, les évènements se passant durant une réunion dans un bureau le matin feraient tous parties de la même situation, tandis que les évènements se passant en dehors de ce bureau, ou en après-midi dans ce bureau, feraient parties d'une autre situation. Le modèle de situation réfère ainsi à une situation caractérisée par ses protagonistes (objets ou personnes), par ses causalités ainsi que par ses contraintes de temps et d'espace (Gineste et Le Ny, 2002). Évidemment, l'aspect dynamique du modèle de situation permet de lier les différentes situations entre elles par des liens causals ou encore temporels et ainsi représenter la progression des évènements (Radvansky et Dijkstra, 2007). À l'intérieur de la situation, il existe une structure entre les différents éléments via notamment les relations sociales entre les personnages ou encore les relations spatiales entre les objets (par exemple, la lampe sur la table). Bref, la construction de ce modèle mental permet la mise en relation des divers éléments du texte dans un cadre spatial et un cadre temporel.

Le modèle de situation se construit et évolue, via des mises à jour de ce dernier, de façon progressive tout au long de la lecture, et ce simultanément à la construction de la base du texte (Chesneau et al., 2007b, Ska et Duong, 2005, Denhière et Baudet, 1992). Dès le début du texte, le lecteur crée un modèle de

situation qui sera par la suite renforcé, modifié ou remplacé au fil des nouvelles informations acquises lors de la lecture (Chesneau et al., 2007b, Ska et Duong, 2005). En fait, un nouveau modèle de situation pourrait être créé par le lecteur à chaque fois que le texte décrit un nouvel évènement ou lorsqu'un nouveau lieu ou temps est ajouté (Radvansky et Dijkstra, 2007). Ainsi, un texte décrivant une seule situation pourra être intégré en un seul modèle de situation, tandis qu'un texte décrivant plusieurs situations devra être intégré en autant de modèles. Un ensemble de faits, distants dans le texte, mais référant à la même situation sera intégré en un modèle de situation commun (Radvansky, 1999b). La construction du modèle de situation est donc un processus cognitif très dynamique dans lequel de nombreuses mises à jour sont nécessaires.

Contrairement à la base du texte, le modèle de situation n'est pas toujours une représentation propositionnelle (Kintsch, 1988). Par exemple, il peut être sous la forme d'une carte mentale dans le cas où une information spatiale est donnée ou encore sous une forme procédurale lorsque qu'une liste d'instructions est donnée (Perrig et Kintsch, 1985). Il n'est pas lié aux structures spécifiques du texte (Radvansky et Dijkstra, 2007). Ainsi, ce modèle n'est pas exclusif au discours, pouvant aussi être utilisé par exemple dans l'étude de la mémoire (Radvansky et al., 1996) ou du raisonnement logique (Johnson-Laird et al., 1992).

Superstructure

La superstructure du texte constitue tant qu'à elle un cadre d'organisation pour les autres niveaux. En effet, chaque type de discours, qu'il soit narratif, explicatif, procédural ou autre, possède une structure particulière, ou plan organisationnel, qui lui est propre. Cette structure, relevant de la connaissance générale, sert de guide au lecteur, qui n'abordera pas de la même façon, par exemple, un discours narratif et un discours procédural (Chesneau, 2007). Cette connaissance de l'organisation du discours permet l'anticipation et oriente le traitement des informations qui devra être fait lors de lecture (Ska et Duong, 2005). La superstructure pourrait avoir pour effet de faciliter plusieurs aspects de la compréhension du discours comme le stockage et la récupération d'informations en encadrant la représentation structurelle mentale du discours (Van Dijk et Kintsch, 1983). La compréhension du discours est grandement influencée par la culture du lecteur. Ainsi, les superstructures peuvent être vues comme des patrons préprogrammés de l'organisation de certains types de discours dérivés des apprentissages, faits par le lecteur, des différentes conventions propres à chacun de ces types (par exemple, les conventions du conte pour enfants diffèrent des conventions de la tragédie) (Van Dijk et Kintsch, 1983). Alors que les autres niveaux de compréhension suggèrent un traitement ascendant (*bottom-up*) du discours, la superstructure propose un cadre à ce traitement qui serait davantage descendant (*top-down*).

En résumé, quatre niveaux entrent en ligne de compte dans la compréhension du discours :

1. Le texte de surface correspondant aux composantes linguistiques (vocabulaire, grammaire et syntaxe).
2. La base du texte correspondant aux détails du texte (micropropositions) et aux idées importantes du texte (macropropositions).
3. Le modèle de situation correspondant à une représentation du texte intégrant les connaissances du lecteur.
4. La superstructure correspondant au type de texte lu et servant de cadre aux autres niveaux.

Afin de comprendre, le lecteur doit être en mesure de construire une base de texte cohérente et d'en tirer l'essentiel tout en développant simultanément un modèle de situation lui permettant de produire une représentation mentale des événements, personnages et objets dans un cadre spatial et temporel. La compréhension du discours implique donc principalement deux aspects : la base du texte (ce que le texte dit) et le modèle de situation (sur quoi porte le texte) (Perfetti et Frishkoff, 2008).

Dans cette thèse, tous les textes utilisés (voir Annexe I) sont d'un même niveau linguistique, ainsi le niveau de surface ne sera pas davantage élaboré. De même, tous les textes utilisés sont des textes narratifs courts, donc le niveau de superstructure ne sera pas davantage abordé. Cette thèse traitera donc

principalement de la base du texte (microproposition et macroproposition) et du modèle de situation.

3.2. Les mécanismes et fonctions cognitives impliqués dans le modèle de construction-intégration de Kintsch

Le modèle de construction-intégration de Kintsch distingue deux processus principaux. D'abord, un processus de construction lors duquel le réseau de propositions de la base du texte est construit à partir du texte de surface (composantes linguistiques) et des connaissances du lecteur. Puis, un processus d'intégration où ce réseau construit est intégré aux réseaux construits précédents afin de former un tout cohérent (Kintsch, 1988). Cette façon de construire et intégrer permet l'activation de propositions provenant du texte, du contexte lexical ou sémantique, des connaissances générales du lecteur et d'inférences (Chesneau, 2007). Il en résulte un modèle de situation, soit une représentation du texte intégrée à d'autres connaissances du lecteur (Kintsch, 1988). La compréhension du discours se déroule par cycle et dépend de plusieurs fonctions cognitives, principalement de différents types de mémoire et des capacités d'inhibition (Chesneau et al., 2007a, Radvansky, 1999b).

En effet, les propositions sémantiques élaborées à partir de l'information contenue dans la surface du texte entrent d'abord dans une mémoire à court terme où elles sont réordonnées puis intégrées dans le réseau de propositions de

la base du texte qui se construit au fur et à mesure de la lecture (Kintsch, 1988, Chesneau et al., 2007a). Comme mentionné plus tôt, les propositions sont reliées entre elles par des arguments communs assurant la cohérence locale du réseau (Kintsch, 1988, Chesneau, 2007). La mémoire de travail permet les différents traitements nécessaires au maintien et à l'élaboration du réseau de propositions ainsi qu'à l'extraction des macropropositions permettant la cohérence globale du réseau (Radvansky et Copeland, 2004, Chesneau et al., 2007a). Ce réseau est mis à jour à chaque cycle de compréhension, soit avec l'arrivée de nouvelles propositions (Kintsch, 1988).

Le réseau est d'abord construit de manière incohérente, plusieurs éléments associés au texte y sont inclus, même s'ils sont, en fin de compte, inappropriés (Kintsch, 1988). Les processus d'intégration permettent alors d'exclure ces éléments indésirables de la représentation du discours. Lors de l'intégration du réseau propositionnel, les propositions non pertinentes ou non cohérentes avec le réseau (ayant peu de liens avec les autres propositions) sont désactivées (Kintsch, 1988). Les connaissances de l'individu vont également interagir avec le réseau afin de guider l'élagage des propositions superflues et ainsi ultimement contribuer à la compréhension. En effet, lors de la lecture, deux interprétations lexicales différentes d'une même proposition peuvent être activées. Les entrées subséquentes dans le réseau vont alors permettre d'activer davantage la bonne interprétation et inhiber la moins pertinente, menant à son élimination (Kintsch, 1988). Par exemple, lors de la lecture de la phrase : « La

pêche est bonne. », autant l'interprétation lexicale FRUIT que l'interprétation lexicale ACTION DE PÊCHER pourraient être associées à l'argument PÊCHE. Puis, lors de la lecture de la seconde phrase : « Elle est très juteuse. », l'interprétation lexicale FRUIT sera davantage activée, tandis que l'interprétation lexicale ACTION DE PÊCHER sera inhibée. Ainsi, la connexion entre PÊCHE et FRUIT sera solidifiée et la connexion entre PÊCHE et ACTION DE PÊCHE sera fragilisée.

Au cours de sa lecture, le lecteur pourrait devoir récupérer ou manipuler des informations provenant du texte, mais déjà emmagasinés en mémoire à long terme. Le lecteur doit alors recourir à une mémoire de travail à long terme tel que postulé par Ericsson et Kintsch (Ericsson et Kintsch, 1995, Chesneau et al., 2007a). L'existence de ce type de mémoire de travail se justifierait par le fait qu'une interruption de lecture, pouvant aller de 30 secondes à plusieurs heures, n'empêche pas la compréhension du texte (Ericsson et Kintsch, 1995, Chesneau, 2007). L'implication de ce type de mémoire pourrait également expliquer le maintien de la cohérence globale de l'ensemble du discours (Chesneau et al., 2007a).

Lorsqu'un réseau de propositions est entièrement traité, il forme un modèle de situation final, ou provisoire, qui est emmagasiné dans une mémoire épisodique de texte afin de pouvoir le retrouver ultérieurement (Chesneau et al., 2007a). Lors de la récupération d'un tel modèle de situation, le lecteur doit

inhiber/désactiver les autres modèles de situation qui sont apparentés au modèle nécessaire à l'interprétation en cours, mais non pertinents (Radvansky, 1999b).

Contrairement à l'élaboration de la base de texte, la mémoire de travail ne semble pas jouer un grand rôle dans le traitement du modèle de situation (Radvansky et Dijkstra, 2007). En effet, les études sur le sujet n'ont montré aucune corrélation entre la mémoire de travail et a) les capacités de mise à jour du modèle de situation, notamment suite à un changement spatial (Radvansky et Copeland, 2001); b) la capacité de rappel des événements décrits (Radvansky et Copeland, 2004); c) la détection des inconsistances dans le modèle de situation (Radvansky et Copeland, 2004) et d) la capacité d'intégration de nouvelles informations dans le modèle de situation (Radvansky et Copeland, 2006). Il faut cependant noter que ces études utilisent des empan de mémoire afin de mesurer la mémoire de travail, ce qui veut dire qu'il n'y a pas de corrélation entre les capacités de traitement du modèle de situation et les résultats à ces tests. Ces études n'excluent donc pas totalement un possible rôle de la mémoire de travail dans le traitement du modèle de situation.

La mémoire sémantique aurait un rôle plus assumé dans le traitement du modèle de situation (Radvansky et Dijkstra, 2007). En effet, la mémoire sémantique est responsable, entre autres, d'emmagasiner les connaissances générales, le vocabulaire, les connaissances sur le monde, les connaissances catégorielles et les connaissances sur les schémas. Ainsi, la mémoire

sémantique contribue à la construction et à la mise en contexte du modèle de situation (Radvansky et Dijkstra, 2007). Dans un même ordre d'idée, les mécanismes liés à la cognition sociale et à la théorie de l'esprit contribueraient également à la compréhension en permettant la perception et l'attribution des états émotionnels des personnages, leur intention ainsi que les interactions entre ceux-ci (Mar, 2004).

Les capacités d'inférence constituent un mécanisme cognitif lié au discours permettant au lecteur ou à l'auditeur d'interpréter ou de déduire un sens différent ou une signification supérieure à ce qui était énoncé textuellement dans le discours. Tel que décrit plus tôt, ce mécanisme dépend grandement du modèle de situation qui fournit les informations nécessaires aux capacités d'inférences (Perrig et Kintsch, 1985). Ainsi, c'est à ce niveau de compréhension que sont mis en relation le contenu du texte et les connaissances antérieures du lecteur, ce qui lui permet d'en inférer un nouveau sens. Il existe principalement deux types d'inférences liées à la compréhension : les inférences nécessaires à la construction de la cohérence et à la logique du modèle de situation et les inférences optionnelles élaborées à partir des connaissances antérieures du lecteur (Campion et Rossi, 1999).

Au-delà de l'implication importante de la mémoire de travail et de l'inhibition dans la compréhension du discours, les fonctions exécutives en général sont nécessaires à l'encadrement des processus cognitifs liés à la

compréhension. En effet, les différents contrôles exécutifs découlant de cet ensemble de fonctions permettent l'intégration des connaissances, le maintien et la manipulation du modèle de situation et possiblement la construction de nouvelles inférences aidant à la cohérence du modèle de situation particulièrement lorsque la cohésion de celui-ci est faible et que le lecteur possède peu de connaissances antérieures pertinentes (Moss et al., 2011, Moss et Schunn, 2015).

En résumé, les mécanismes liés à la compréhension du discours, tels que décrits par le modèle de construction-intégration de Kintsch, nécessitent l'apport de plusieurs types de mémoire, des capacités d'inhibition ainsi que la mise en relation entre le réseau propositionnel de la base du texte construit et les réseaux sémantiques et lexicaux formant les connaissances du lecteur. Ces réseaux, une fois intégrés, permettent de former une représentation mentale du texte que l'on appelle le modèle de situation.

3.3. Neuroanatomie de la compréhension du discours

Les nombreux traitements cognitifs nécessaires lors de la compréhension de texte écrit entraînent l'activation de plusieurs régions du cerveau lors de la lecture. Plusieurs de ces traitements se font simultanément rendant difficile l'association entre ces derniers et les régions neuroanatomiques actives lors de la lecture. L'amélioration des connaissances concernant la nature

de l'implication de certaines régions du cerveau lors de la compréhension du discours est devenue possible principalement en faisant varier certaines caractéristiques des textes lors des tâches, puis en comparant les régions cérébrales actives selon chacune des variations.

La compréhension du langage est souvent associée à l'aire de Wernicke, située dans la partie postérieure du lobe temporal gauche. En réalité, l'aire de Wernicke est davantage liée à la reconnaissance des mots, ou au décodage des stimuli linguistiques, principalement lors de l'écoute ou de la production orale et non à l'intégration et à la mise en contexte du discours (DeWitt et Rauschecker, 2013). En fait, certains patients souffrant d'une aphasie de Wernicke, et ayant subi une destruction complète de l'aire de Wernicke, avaient pu relativement bien maintenir leur capacité de compréhension du discours écrit (Sevush et al., 1983). L'aire de Wernicke est donc liée à la compréhension du langage, mais elle ne semble pas essentielle à la compréhension du discours écrit en tant que tel.

Lors de l'écoute d'un texte, le gyrus temporal moyen gauche, les lobes temporaux antérieurs gauche et droit et le cortex préfrontal supérieur gauche seraient activés alors qu'ils ne le sont pas lors de la lecture d'une liste de mot ou d'un texte en langue étrangère (Mazoyer et al., 1993). Les gyrus temporaux supérieurs gauche et droit seraient quant à eux activés peu importe le type de stimuli, étant associé au cortex auditif (Mazoyer et al., 1993). Les lobes

temporaux antérieurs seraient également activés lors de la lecture de phrases (Mazoyer et al., 1993). Ces derniers joueraient un rôle important dans l'intégration sémantique tant au niveau de la phrase qu'au niveau du texte (Perfetti et Frishkoff, 2008). Les lobes temporaux antérieurs seraient parmi les régions les plus constamment actives dans les études de compréhension de phrases ou de textes (Ferstl et al., 2008). Ils pourraient être liés au processus de mémoire épisodique et sémantique ainsi qu'à l'intégration du texte (Ferstl et al., 2008). Le gyrus temporal moyen gauche pourrait être impliqué dans la perception du langage (partie centrale du gyrus), ainsi que l'intégration et l'interprétation (partie antérieure et partie postérieure du gyrus) (Ferstl et al., 2008).

Le cortex préfrontal, plus particulièrement la région préfrontale supérieure dorso-médian, serait impliquée dans le maintien de la cohérence globale du discours, ainsi que dans l'intégration des connaissances (Perfetti et Frishkoff, 2008). L'activation du cortex préfrontal supérieur dorso-médian serait également plus grande lorsque le lecteur doit faire des inférences aux phrases précédentes du texte afin d'intégrer la nouvelle information lue (Schmalhofer et Perfetti, 2007). L'activation du cortex préfrontal latéral gauche et du gyrus frontal inférieur gauche, comprenant l'aire de Broca, pourrait de son côté être associée au traitement au niveau du mot, mais serait davantage observée dans la compréhension du discours oral (Ferstl et al., 2008).

Bien que l'hémisphère gauche serait dominant dans la compréhension du discours, la plupart des processus seraient en fait bilatéraux (Perfetti et Frishkoff, 2008). L'hémisphère droit jouerait un rôle capital dans la compréhension de la pragmatique (élément ne pouvant être compris qu'en connaissance du contexte, comme les métaphores et le sarcasme) et de la prosodie (émotion du discours transmis, notamment, par le ton) (Ferre et al., 2011). Le lobe frontal de l'hémisphère droit serait associé au processus permettant l'intégration du réseau propositionnel élaboré lors de la lecture (Robertson et al., 2000). Il permettrait ainsi d'identifier et lier entre eux les concepts récurrents du texte (Robertson et al., 2000). L'hémisphère droit aurait donc un rôle dans la construction du modèle de situation.

En résumé, la compréhension du discours nécessite la contribution de plusieurs régions cérébrales, notamment les lobes temporaux antérieurs bilatéraux, le gyrus temporal moyen gauche, le cortex préfrontal supérieur dorso-médian gauche, le cortex préfrontal latéral gauche ainsi que l'hémisphère droit.

3.4. Vieillesse et compréhension du discours

Le vieillissement, même normal, entraîne des changements cérébraux. La présente section explorera comment ces changements influencent les capacités de compréhension du discours chez les personnes âgées.

De façon générale, chez les personnes plus âgées, un déclin des performances serait observé lors du traitement du texte en soi, donc principalement la surface de texte et la microstructure (Radvansky et al., 2001, Radvansky et Dijkstra, 2007). Par contre, les personnes âgées maintiendraient de bonnes performances en ce qui a trait au sujet et à l'idée générale du texte, donc au niveau de la macrostructure et du modèle de situation (Radvansky et al., 2001, Radvansky et Dijkstra, 2007). En fait, les personnes âgées auraient de la difficulté à rappeler les détails d'un texte, mais ils auraient peu de problèmes à rappeler l'essentiel d'un texte.

Lors du vieillissement normal, les personnes âgées s'appuieraient davantage sur le modèle de situation pour comprendre un discours que les personnes plus jeunes qui semblent référer autant à tous les autres niveaux de compréhension (Radvansky et al., 2001). En fait, tant la construction du modèle de situation que la mise à jour de ce dernier seraient bien préservées chez les plus âgés (Radvansky et Dijkstra, 2007). Plusieurs hypothèses pourraient expliquer ce phénomène. D'abord, une plus grande difficulté pour les personnes âgées à maintenir le réseau propositionnel de la base du texte est possible. Ainsi, dans leur cas, ce réseau serait plus temporaire que chez les jeunes et servirait davantage à construire le modèle de situation qu'à emmagasiner les détails du texte (Radvansky et al., 2001). Ensuite, il se pourrait que les adultes âgés soient simplement plus sélectifs sur l'information retenue pour le traitement de la compréhension, omettant ainsi plusieurs détails faisant partie

exclusivement de la microstructure (Radvansky et al., 2001). Ensuite, les personnes âgées pourraient utiliser davantage leurs connaissances que les jeunes, notamment en matière de schéma narratif, pour compenser leur traitement au niveau du réseau prépositionnel de la base du texte (Radvansky et Dijkstra, 2007). Finalement, les personnes âgées pourraient utiliser davantage les inférences provenant de leurs connaissances personnelles que le texte de base afin de construire le modèle de situation, ce qui expliquerait leur plus grande difficulté à rappeler des détails précis du texte (Radvansky et Dijkstra, 2007). Les deux dernières hypothèses impliqueraient en quelque sorte que la compréhension du discours chez les personnes âgées reposerait en grande partie sur leur expérience et les connaissances accumulées au cours de leur vie.

Il faut cependant noter que la compréhension du discours chez la personne âgée dépendrait en grande partie des caractéristiques du texte présenté, plus particulièrement de sa charge sémantique (Chesneau et al., 2007a). Lorsque la charge sémantique du texte est élevée, les personnes âgées auraient de la difficulté à rappeler la microstructure du texte, mais de la facilité à rappeler la macrostructure et le modèle de situation (Chesneau et al., 2007a). Ceci pourrait s'expliquer par une surcharge de la mémoire de travail chez les personnes âgées qui limiterait le rappel de la microstructure (Tun et al., 1991). Par contre, lorsque la charge sémantique du texte est faible, ces derniers auraient plus de facilité à rappeler la microstructure du texte, tandis qu'ils auraient plus de difficulté à rappeler la macrostructure et le modèle de situation

(Chesneau et al., 2007a). Ceci pourrait s'expliquer par une plus grande difficulté à sélectionner les idées principales du texte possiblement à cause d'une difficulté à organiser et hiérarchiser les propositions du texte (Radvansky, 1999a).

Les modifications que subissent les mécanismes de compréhension du discours avec l'âge pourraient s'expliquer en partie par le déclin de certaines composantes cognitives interagissant avec la compréhension du discours. Il faut citer, notamment, le déclin de la mémoire de travail (Brebion, 2003, DeDe et al., 2004), le déclin de certains aspects de l'inhibition, plus particulièrement la déletion des éléments moins pertinents et la résistance à l'interférence (Zacks et al., 1996, Van der Linden et al., 1999), et la diminution de la vitesse de traitement qui se reflète entre autres dans les temps de réponses aux questions sur le texte lu (Brébion et al., 1997). Selon certains, ces trois fonctions cognitives seraient en fait les médiateurs de l'altération de la compréhension du discours avec l'âge (Van der Linden et al., 1999). Il est également intéressant de noter que l'étude du mouvement des yeux n'a démontré aucune différence significative entre les personnes plus jeunes et les personnes plus âgées lors de la lecture de textes, démontrant plutôt une grande hétérogénéité à l'intérieur de chaque groupe en ce qui a trait à la vitesse de lecture (Chesneau et al., 2007a).

À ce jour, encore peu d'études se sont intéressées aux changements neuroanatomiques associés au vieillissement normal dans le domaine de la

compréhension du discours. Il faut cependant noter une étude de Scherer (2012) qui décrit une réorganisation cérébrale à la fois intra et inter-hémisphérique chez des personnes âgées ayant maintenu de bonnes capacités de compréhension du discours (Scherer et al., 2012). Cependant, les données collectées dans cette étude ne tiennent compte que de la partie postérieure du lobe frontal et d'une partie du lobe temporal. Ainsi, dans le cadre de cette étude, il n'est pas possible d'apprécier l'ensemble de la réorganisation cérébrale chez ces personnes âgées, notamment dans les régions préfrontales jouant un rôle dans la compréhension du discours tel que vu dans la section précédente.

Bref, le vieillissement normal a une influence sur la compréhension du discours, même si les capacités de soutirer l'information essentielle d'un texte semblent somme toute bien maintenues. Une réorganisation cérébrale intra et inter-hémisphérique semble jouer un rôle dans cette influence. Cependant, peu de données concernant ces changements sont disponibles. Ainsi, de nouvelles études seront nécessaires afin de mieux saisir l'ampleur de cette réorganisation cérébrale et de cerner l'interaction entre cette réorganisation cérébrale et les capacités de compréhension du discours chez les personnes âgées.

4. Neuroimagerie

Le développement des techniques de neuroimagerie a permis un raffinement des études sur la fonction cérébrale en permettant l'acquisition de

données sur des sujets humains vivants. Au fil des ans, plusieurs techniques furent développées, contribuant chacune à leur façon à l'avancement des connaissances sur le cerveau et la cognition. Parmi les plus utilisées, il faut mentionner :

- l'électroencéphalographie (EEG) et le potentiel évoqué (ERP pour *Event-Related Potential*) qui mesurent l'activité électrique des neurones,
- la magnétoencéphalographie (MEG) qui mesure le champ magnétique induit par l'activité électrique des neurones,
- la tomographie par émission de positons (TEP) qui mesure des traceurs radioactifs injectés par intraveineuse qui se fixent à certaines cibles dans le cerveau,
- l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) qui mesure les changements de concentration locale de déoxyhémoglobine via son effet de perturbation du champ magnétique imposé par l'appareil,
- la stimulation magnétique transcrânienne (SMT) qui permet l'excitation ou l'inhibition d'une région cérébrale par l'application d'un champ magnétique
- et finalement l'imagerie spectroscopique proche infrarouge (NIRS pour *Near-Infrared Spectroscopy*) qui mesure les changements de concentration d'oxyhémoglobine et de déoxyhémoglobine via l'effet de ces molécules sur la densité optique d'un rayon lumineux (Strangman et al., 2002, Rodden et Stemmer, 2008).

La prochaine section détaillera davantage cette dernière technique qui est utilisée pour réaliser les travaux de cette thèse.

4.1. Imagerie Spectroscopique proche infrarouge

Les méthodes d'imagerie optique se basent sur l'interaction de la lumière avec les tissus biologiques (Gratton et Fabiani, 2007). Il existe une fenêtre de longueurs d'onde proche infrarouge, entre 650 et 950 nanomètres (nm), où il est possible d'obtenir une pénétration et une détection de la lumière dans les tissus à une profondeur de près de 5 cm, car les longueurs d'onde de cette fenêtre sont très peu absorbées par l'eau et les tissus biologiques (Strangman et al., 2002, Gratton et Fabiani, 2007). En fait, ce spectre de lumière ne serait absorbé que par quelques chromophores biologiques, dont l'hémoglobine, la myoglobine et les cytochromes oxydases des mitochondries (Hoshi, 2003). La présence de ces chromophores aura donc pour effet d'absorber une partie des photons et ainsi diminuer l'intensité du rayon lumineux. L'imagerie spectroscopique proche infrarouge (NIRS), une méthode d'imagerie optique, permet donc d'estimer la variation de la concentration de ces chromophores, principalement de l'hémoglobine dans la microvascularisation cérébrale, à partir de la mesure de la variation de l'intensité de la lumière propagée dans les tissus.

L'activité cérébrale provoque une réponse hémodynamique locale au niveau de la microvascularisation du cerveau. Il est attendu que l'activité cérébrale entraîne une diminution de la concentration de déoxyhémoglobine (HbR pour hémoglobine réduite) et une augmentation de la concentration d'oxyhémoglobine (HbO ou HbO₂) et d'hémoglobine totale, sommation d'HbO et d'HbR, dans les régions actives, puis un retour à la normale de ces concentrations (Hoshi, 2007). Puisque HbO et HbR sont deux chromophores absorbant les longueurs d'onde près de l'infrarouge, il est possible de calculer la variation de concentration de ces composantes de la réponse hémodynamique (Hoshi, 2003). De plus, HbO et HbR possèdent différentes caractéristiques optiques selon les diverses longueurs d'onde comprises dans le spectre proche infrarouge. Il est ainsi possible de les distinguer en combinant l'information obtenue par deux longueurs d'onde, généralement une à ≈ 690 nm plus sensible à HbR et une à ≈ 830 nm plus sensible à HbO (Strangman et al., 2002, Strangman et al., 2003, Safi et al., 2012).

L'acquisition de données en NIRS se fait via l'utilisation d'optodes, soit de sources lumineuses et de détecteurs (photodiodes), positionnées et maintenues en place sur la peau d'un participant. En neuroimagerie, les optodes sont placées sur le front et/ou le cuir chevelu, selon les régions d'intérêt. Le type d'appareil le plus fréquemment utilisé en imagerie fonctionnelle est le type *continuous-wave* où les sources émettent une lumière en continu via des lasers calibrés à des longueurs d'onde précises et où l'on mesure l'intensité de la

lumière transmise aux détecteurs (Hoshi, 2003, Strangman et al., 2002). La lumière émise se propage dans le tissu cérébral de manière à former une sphère. Ce phénomène est dû à la diffusion de la lumière qui dépend des propriétés optiques du milieu. Ainsi, la zone de la mesure effectuée par un détecteur correspond à une aire ayant une forme de banane entre la source et ce détecteur, plus grande que la distance source-détecteur. La profondeur imagée est donc d'environ 1 à 2 cm sous la surface du cortex dépendamment de la distance séparant ces optodes (Hoshi, 2003). Le rayon lumineux doit également traverser la peau et le crâne, d'une épaisseur totale allant de 1 à 2 cm chez les adultes (Strangman et al., 2003). La lumière se disperse donc également dans ces tissus et leur vascularisation, par contre la perte d'intensité de la lumière due à ce passage serait constante et affecterait peu la variation de l'intensité mesurée lors de l'activité cérébrale (Strangman et al., 2003). Ainsi, les changements de concentration d'HbO et d'HbR dans la microvascularisation du cerveau, lors d'une activité cérébrale, entraînent une altération de l'intensité de la lumière détectée. La distance entre une source et un détecteur devrait se situer entre 2 et 5 cm, puisqu'une distance plus courte ne permettrait pas à la lumière allant de la source au détecteur de pénétrer le cortex et qu'avec une distance plus grande, trop peu de lumière se rendrait au détecteur pour assurer une mesure stable (Gratton et Fabiani, 2007).

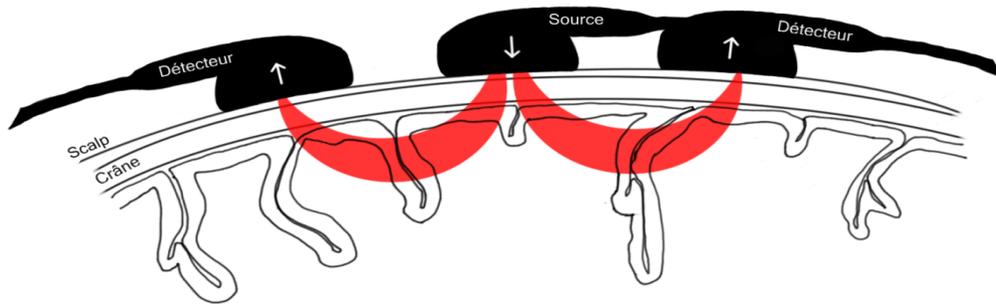


Figure 1. Schéma du parcours de la lumière dans le cerveau lors de l'utilisation de la NIRS.

À partir de l'intensité de la lumière entrant dans le milieu (I_0) et de l'intensité de la lumière sortant du milieu (I), la loi de Beer-Lambert permet de calculer l'absorbance du milieu (A) (Hoshi, 2003, Strangman et al., 2003). Cette loi permet, par la suite, de calculer la concentration d'un chromophore présent dans le milieu (C) à partir de l'absorbance calculée (A), de la longueur du trajet de la lumière (L) et du coefficient d'extinction molaire de ce chromophore (ϵ_λ) (coefficient variant en fonction de la température et de la longueur d'onde de la lumière) (Hoshi, 2003, Strangman et al., 2003).

Loi de Beer-Lambert :

$$A = -\log_{10} \frac{I}{I_0} = \epsilon_\lambda \cdot C \cdot L$$

- A : Absorbance ou densité optique
- I : Intensité de la lumière sortante
- I_0 : Intensité de la lumière entrante
- ϵ_λ : Coefficient d'extinction molaire à une longueur d'onde donnée
- C : Concentration du chromophore
- L : Longueur du trajet optique

Les tissus biologiques n'étant pas un milieu uniforme, cette loi doit être modifiée par l'ajout d'un facteur tenant compte de la plus grande distance parcourue par les photons à cause de la dispersion dans le milieu (Strangman et al., 2003). Une constante devrait aussi être ajoutée pour tenir compte de la dissipation (perte) du rayon lumineux causée par les tissus, mais il est impossible de la déterminer. Par contre, puisque la dissipation causée par les tissus est constante, la loi modifiée de Beer-Lambert permet d'estimer les variations d'absorbance et les changements de concentration des chromophores, mais pas les concentrations absolues (Hoshi, 2003). Dans le domaine de la NIRS, la loi modifiée de Beer-Lambert permet donc d'estimer les variations de concentration d'HbO et d'HbR de la microvascularisation du cortex cérébral à partir des variations de l'intensité de la lumière détectée lors de l'activité cérébrale.

Loi modifiée de Beer-Lambert simplifiée (Villringer et Chance, 1997) :

$$\Delta A = \varepsilon_{\lambda} \cdot \Delta C \cdot L \cdot l_{DPF}$$

ΔA : Variation de l'absorbance ou densité optique

ε_{λ} : Coefficient d'extinction molaire à une longueur d'onde donnée

ΔC : Variation de la concentration du chromophore

L : Longueur du trajet optique

l_{DPF} : *Differential Pathlength Factor* (facteur tenant compte du plus grand chemin que la lumière doit parcourir à cause de dispersion et de l'effet d'absorption)

Afin de pouvoir déterminer la variation de concentration (ΔC), il faut deux équations pour deux longueurs d'onde différentes, pour lesquelles les

coefficients d'extinction sont connus dans la littérature (Villringer et Chance, 1997).

L'activité neuronale d'une région couverte par le trajet de la lumière entre une source et un détecteur peut donc être déduite via les variations de concentration d'HbO et d'HbR caractérisant la réponse hémodynamique. Tel que mentionné plus tôt, une réponse hémodynamique typique, témoignant d'une activité cérébrale, se caractérise par une forte augmentation de la concentration d'HbO couplée à une légère diminution de la concentration d'HbR, puis d'un retour à la normale de ces concentrations. C'est donc en présence d'une telle réponse qu'une activité cérébrale peut être déduite. La variation de concentration d'HbO serait une mesure plus robuste et fiable de la réponse hémodynamique et de l'activation neuronale que la variation de concentration d'HbR (Wilcox et al., 2009). Plusieurs paramètres des variations de concentrations d'HbO et d'HbR peuvent être utilisés afin de qualifier ou de comparer les réponses hémodynamiques observées. La plus commune, et celle utilisée dans cette thèse, est l'amplitude moyenne des variations de concentration d'HbO et/ou d'HbR sur la durée de la réponse hémodynamique. Par contre, il est aussi possible de prendre en considération les pics des réponses d'HbO et/ou d'HbR (amplitude maximale de variation des concentrations), le temps pour atteindre ces pics, l'aire sous la courbe de variations d'HbO et d'HbR ou encore l'index de pente de ces deux réponses (Mandrick, 2013).

L'EEG, l'ERP et la MEG sont des méthodes de neuroimagerie dites directes puisqu'elles mesurent directement les champs électriques ou magnétiques produits par les neurones. La TEP et l'IRMf sont des techniques dites indirectes puisqu'elles mesurent généralement des changements hémodynamiques provoqués par l'activité cérébrale (Strangman et al., 2002, Rodden et Stemmer, 2008). De façon générale, les techniques directes possèdent une bonne sensibilité temporelle (de l'ordre des millisecondes), mais une sensibilité spatiale restreinte (de l'ordre des centimètres) tandis que les techniques indirectes possèdent une sensibilité temporelle restreinte (de l'ordre des secondes ou plus), mais une excellente sensibilité spatiale (de l'ordre des millimètres) (Strangman et al., 2002). Bien que la NIRS soit une technique indirecte, mesurant la réponse hémodynamique, elle possède une meilleure sensibilité temporelle que les autres techniques indirectes, tout en conservant une sensibilité spatiale, moins bonne, mais tout de même respectable (de l'ordre de 1 à 3 cm avec l'utilisation de NIRS *continuous-wave*). Sa sensibilité spatiale reste meilleure que celle des techniques directes, mais sa sensibilité temporelle leur est inférieure (de l'ordre de quelques ms avec l'utilisation de NIRS *continuous-wave*) (Strangman et al., 2002, Rodden et Stemmer, 2008). En fait, la NIRS se situe entre les techniques directes et indirectes au niveau de la sensibilité spatiale et temporelle.

Le principal avantage de la NIRS est son caractère totalement non-invasif, ce qui facilite les études avec les jeunes enfants, les bébés prématurés et

les personnes âgées (Strangman et al., 2002, Hoshi, 2007). La NIRS est également moins coûteuse et davantage portable et compacte que l'IRMf ou la TEP rendant possible l'utilisation de l'appareil dans une plus grande variété d'endroits (Strangman et al., 2002). Elle est également moins sensible aux mouvements, ne requérant pas une immobilité parfaite comme l'IRMf, facilitant encore une fois les études chez les enfants et les personnes âgées et permettant d'effectuer des études en position assise ou debout (Hoshi, 2007). Contrairement à l'IRMf qui est très bruyante, la NIRS est tout à fait silencieuse, facilitant les études sur le langage par la création d'un environnement plus naturel et plus approprié pour la lecture ou l'écoute de mots ou de textes (Strangman et al., 2002). La NIRS est également la seule technique de calcul des variations de concentration d'HbO (Hoshi, 2007). Le principal désavantage de la NIRS est sa faible pénétration limitant les régions pouvant être étudiées avec cette technique à la surface du cortex jusqu'à une profondeur d'environ 2 cm (Hoshi, 2007, Strangman et al., 2002). La précision de la localisation anatomique des données recueillies par la NIRS est également beaucoup moins grande qu'avec l'IRMf (Strangman et al., 2002).

En résumé, la NIRS est une technique permettant de calculer les variations d'HbO et d'HbR dans la microvascularisation du cortex cérébral via la mesure de l'intensité d'un rayon lumineux. Il s'agit d'une technique jouissant d'une sensibilité spatiale et temporelle respectable. La NIRS est complètement non-invasive et très silencieuse facilitant les études sur le langage et les études

sur le vieillissement, rendant cette technique idéale pour le projet dont il est question dans cette thèse.

5. Buts et hypothèses

Cette thèse comporte deux objectifs principaux :

- a. Évaluer l'influence potentielle du vieillissement normal sur les capacités de compréhension du discours et sur l'activité cérébrale sous-jacente.

Hypothèse comportementale : Les participants âgés devraient obtenir de moins bons résultats au niveau du traitement des micropropositions, mais des résultats comparables aux plus jeunes aux niveaux du traitement des macropropositions et de l'inférence du modèle de situation.

Hypothèse activité cérébrale : Selon le modèle CRUNCH, les participants âgés devraient démontrer une plus grande activité cérébrale, en particulier dans les régions du cortex préfrontal.

- b. Évaluer l'influence potentielle de la scolarité sur les capacités de compréhension du discours et sur l'activité cérébrale sous-jacente dans une population âgée.

Hypothèse comportementale : Les participants ayant un plus haut niveau de scolarité devraient avoir de meilleurs résultats à la tâche de compréhension plus particulièrement dans la sous catégorie du modèle de situation où l'intégration des informations et des inférences sont nécessaires.

Hypothèse activité cérébrale : Puisqu'ils devraient avoir une plus grande réserve cognitive, les participants ayant un plus haut niveau de scolarité devraient démontrer davantage de plasticité cérébrale, soit sous la forme d'une plus grande réponse hémodynamique dans certaines régions ou par l'activation de plus de régions.

Cette thèse aborde également un objectif secondaire :

- c. Évaluer si les habitudes de lecture pourraient avoir un effet modulateur sur les capacités de compréhension du discours et sur la plasticité cérébrale qui y est associée lors du vieillissement.

Hypothèse comportementale : Les participants ayant l'habitude de lire fréquemment devraient mieux réussir les questions sur le modèle de situation qui est le niveau de compréhension le plus élevé et le plus complexe. Les habitudes de lecture devraient avoir moins d'effet sur le niveau des micropropositions qui repose davantage sur la mémoire de travail à court terme.

Hypothèse activité cérébrale : Le niveau d'activité cérébrale devrait être moins grand chez les participants ayant l'habitude de lire fréquemment, car ils sont plus accoutumés à ce type de tâche, il y aurait donc un possible effet d'entraînement souvent observé dans d'autres études (Fincham and Anderson, 2006, Kelly and Garavan, 2005).

Chacun de ces objectifs, et hypothèses associées, sera abordé dans un des articles de la section suivante, puis sera ensuite repris dans la discussion générale de cette thèse.

Chapitre 2 : Articles

**Article I. Narrative discourse in young and older adults:
Behavioral and NIRS analyses**

MARTIN, Charles-Olivier. PONTBRIAND-DROLET, Stéphanie. DAOUST, Valérie. YAMGA, Eric. AMIRI, Mahnoush. HÜBNER, Lilian C. SKA, Bernadette. (2016). Narrative discourse in young and old adults: behavioral and NIRS analyses. Soumis à *Brain and Behavior*.

Le premier article aborde l'effet du vieillissement et traite des différences de capacité de compréhension du discours et de l'activité cérébrale sous-jacente entre un groupe âgé (66-78 ans) et un groupe jeune (20-27 ans). Il en ressort que les personnes âgées ont plus de difficulté avec le traitement de la microstructure et du modèle de situation, mais qu'ils ont les mêmes capacités de rappel de la macrostructure que les plus jeunes. De plus, les personnes âgées présentent une plus grande réponse hémodynamique dans les régions préfrontales gauches lors de la lecture et de la compréhension des textes présentés lors de la tâche.

Charles-Olivier Martin est l'auteur principal de cet article, il était également responsable du protocole, de la collecte et du traitement des données, des analyses et de la rédaction du manuscrit. Stéphanie Pontbriand-Drolet a contribué au traitement et à l'analyse des données. Valérie Daoust et Eric Yamga ont participé au recrutement et à la passation des participants dans le cadre de stages de recherche. Manoush Amiri a été une personne ressource pour ce qui a trait à la technique d'imagerie optique. Lilian Hübner a élaboré une première version de la tâche expérimentale utilisée dans le présent protocole. Bernadette Ska a supervisé le projet en tant que directrice de thèse.

Narrative discourse in young and older adults: Behavioral and NIRS analyses

Charles-Olivier Martin^{1, 2}, Stéphanie Pontbriand-Drolet^{1, 2}, Valérie Daoust^{1,2}, Eric Yamga^{1,2}, Mahnoush Amiri^{2,3}, Lilian Cristine Hübner⁴ and Bernadette Ska^{1,2}

¹ Faculty of medicine, Université de Montréal

² Centre de Recherche, Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal, Canada

³ École Polytechnique de Montréal, Canada

⁴ Pontificia Universidade Catolica do Rio Grande do Sul

Abstract

Discourse comprehension is pivotal in communication capabilities, making it an important component of elderly populations' quality of life. The aim of this study is to evaluate changes in discourse comprehension and the underlying brain activity. Thirty-six participants (18 elderly adults, 18 young adults) read short stories and answer probes in three conditions: microproposition, macroproposition and situation model. Using NIRS, the variation in HbO and HbR concentrations was assessed throughout the task. The results revealed that the older adults performed with equivalent accuracy to the young ones at the macroproposition level of discourse comprehension (gist of the text), but were less accurate at the microproposition (details) and situation model (inference component) levels. Similar to what is described in the CRUNCH model, older participants tended to have greater activation in the left dorsolateral prefrontal cortex while reading in all conditions. Although it did not enable them to perform similarly to younger participants in all conditions, this over-activation could be a compensation mechanism.

1. Introduction

Comprehension is a basic component of communication. Being able to extract the gist of discourse, while reading a text or listening to a speech, and relate it to our own knowledge of the world is essential for appropriate behavior in society. Thus, understanding the changes in discourse comprehension capacity and in the underlying brain changes during aging is crucial to maintain the elderly population's quality of life.

1.1. Discourse comprehension

The construction-integration model (Kintsch and van Dijk, 1978, Kintsch, 1988) describes comprehension as a progressive construction, through many cycles, in which successive propositional networks are elaborated and integrated into the networks built in prior cycles to form a cohesive whole. This model lists four levels of representation in the comprehension process that interact back and forth through the cycles of comprehension. Those levels will be described below.

First, the surface form refers to the linguistic components of discourse such as vocabulary and grammar without regard to its contents (Ska and Duong, 2005, Chesneau et al., 2007b).

Second, the textbase corresponds to the propositions of a text joined together in a structured, cohesive network (Kintsch and van Dijk, 1978). Two types of propositions and structures can be distinguished in the first model developed by Kintsch. (a) Micropropositions and microstructure contain all the propositions of the discourse in a hierarchical network (Kintsch and van Dijk, 1978). Thus, the microstructure comprises all the information and details of the discourse. (b) Macropropositions and macrostructure are derived from the microstructure by deleting the unneeded propositions and generalizing some groups of propositions, forming the gist of the discourse (Kintsch and van Dijk, 1978). The macrostructure reduces and organizes the information in the textbase without losing the significance of the discourse (Denhière and Baudet, 1992).

Third, in the updated construction-integration model, the situation model tends to overlap the macrostructure. The situation model is a mental representation of the discourse integrating the individual's knowledge (Kintsch, 1988). Unlike the textbase, the situation model does not represent the text itself but the subjects and events described in it (Radvansky et al., 2001). A situation model is a situation containing events, objects and characters delimited in time and space. An event taking place in a different time or space would be considered part of a new situation model (Radvansky and Dijkstra, 2007). The situation model results from inferencing capacity, which is essential to comprehension, because it associates with the text the necessary information

from the knowledge of an individual and integrates the various pieces of information in the discourse (Perrig and Kintsch, 1985). In our study, the gist of information portion of the mental representation is classified as the macrostructure, and the inferences needed to properly build the mental representation are classified as the situation model.

Finally, the superstructure constitutes a framework for the other levels corresponding to the type of discourse presented (e.g., narrative or procedural). This framework allows one to anticipate and orient information processing depending on the type of discourse (Ska and Duong, 2005). This level will not be considered further here, because all texts in this study are narratives. Thus, this study will focus only on the textbase and the situation model.

The processes needed to accomplish discourse comprehension involve several cognitive functions and brain regions. Studies have shown that inhibition (Kintsch, 1988) and working memory (Radvansky and Copeland, 2004, Chesneau et al., 2007a) are involved at the textbase level, while inhibition (Radvansky, 1999b), long-term working memory (Ericsson and Kintsch, 1995) and semantic memory play a role at the situation model level (Radvansky and Dijkstra, 2007).

Although discourse comprehension depends mainly on the left hemisphere, most of the relevant processes need the contribution of both

hemispheres (Perfetti and Frishkoff, 2008). The right hemisphere is also known for its role in pragmatic comprehension (Ferre et al., 2011). The anterior temporal lobes and left middle temporal gyrus could be involved in the semantic integration and interpretation of text in discourse as they are only activated while listening or reading meaningful texts or sentences (Mazoyer et al., 1993, Ferstl et al., 2008, Perfetti and Frishkoff, 2008). The prefrontal cortex, especially the superior dorsomedial prefrontal cortex, may be involved in the integration of one's knowledge or when inferences from earlier parts of the discourse are needed, thus contributing to the maintenance of global coherence of texts (Schmalhofer and Perfetti, 2007, Perfetti and Frishkoff, 2008).

Aging is known to have an impact on many cognitive functions, some of which, like working memory, are involved in discourse comprehension (Brebion, 2003, DeDe et al., 2004). Among other things, elderly participants seem to rely more on the gist of the text and the situation model while performing comprehension tasks, while younger participants rely more on the textbase and microstructure (Radvansky et al., 2001, Radvansky and Dijkstra, 2007). On the other hand, it seems that the characteristics of a text, especially its semantic load, highly influence the capacities of older adults to recall the microstructure and macrostructure. In fact, older adults have more problems recalling the microstructure of texts containing a lot of propositions (high semantic load) than texts with few propositions (low semantic load).

Conversely, they have more problems recalling the macrostructure of texts with a low semantic load than texts with a high semantic load (Chesneau et al., 2007a). These results highlight the complex influence of working memory on the changes in discourse comprehension during aging, as it seems to be easier to handle and extract the essential information of a text when it has a high semantic load, even if each propositions become harder to recall in itself.

1.2. Models of aging

Several models have sought to explain the brain plasticity mechanisms that apply during aging in relation to cognitive decline. Three models are relevant to our study.

The Compensation-Related Utilization of Neural Circuits Hypothesis (CRUNCH) specifies that the over-activation of brain regions often observed in elderly participants is a compensation mechanism (Reuter-Lorenz and Cappell, 2008). This over-activation may entail activation of more regions than in younger people or greater activation of the region normally dedicated to the task. Although the goal of those mechanisms is to maintain performance, they are not always sufficient (Reuter-Lorenz and Cappell, 2008). The dorsolateral prefrontal cortex often plays a compensatory role (Cappell et al., 2010, Reuter-Lorenz and Cappell, 2008).

The Hemispheric Asymmetry reduction in Older Adults (HAROLD model) describes an interhemispheric reorganization in which older participants who perform better at some memory tasks show more bilateral brain activation than participants who perform worse (Cabeza, 2002). This bilateralization, or asymmetry reduction, is reported in the prefrontal cortex in studies of episodic and semantic memory retrieval, working memory and inhibition, but it has also been observed in the temporal and parietal cortex during face perception and encoding tasks (Cabeza, 2002, Cabeza et al., 2002). Because this reorganization has only been described in older participants who perform similarly to younger participants, it is classified as an effective compensatory mechanism.

The Posterior-Anterior Shift in Aging (PASA model) describes an intrahemispheric reorganization in which some older adults show greater activation in the prefrontal and frontal regions and lesser activation in the parietal and occipital regions than in younger adults (Davis et al., 2008). This reorganization has been observed in episodic memory retrieval and visual perception tasks (Davis et al., 2008) and in visual selective attention tasks (Ansado et al., 2012). Those mechanisms may reflect a greater recruitment of attentional resources in order to compensate for the decline in sensory processes (Ansado et al., 2012, Madden, 2007).

Only one previous study investigated cerebral plasticity in a comprehension task. It described both an intrahemispheric and an

interhemispheric reorganization (Scherer et al., 2012). Nonetheless, that study only collected data from the posterior part of the frontal lobes and a part of the temporal lobes.

1.3. NIRS technique

Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) uses near-infrared light to examine the changes in concentration of different chromophores such as oxyhemoglobin (HbO) and deoxyhemoglobin (HbR) (Hoshi, 2003). Since those chromophores partially absorb near-infrared light in the range of 650–950 nm, a change in their concentration will alter the intensity of light passing through a tissue (Strangman et al., 2002, Gratton and Fabiani, 2007). Brain activity induces a hemodynamic response in local microvascularization characterized by an increase in HbO concentration coupled with a decrease in HbR concentration and followed by a return to normal (Hoshi, 2007). This response allows NIRS to be used to assess hemodynamic changes and to deduce local brain activity as a result.

The NIRS technique is known to have better temporal resolution but poorer spatial resolution than functional magnetic resonance imaging (fMRI) and better spatial resolution but poorer temporal resolution than electroencephalography (EEG) (Strangman et al., 2002, Rodden and Stemmer, 2008). NIRS has limited penetration, from 1 to 2 cm under the surface of the

cortex (Hoshi, 2003). It's totally non-invasive nature facilitates studies with babies, young children and elderly people (Strangman et al., 2002). For purposes of our study, NIRS is particularly useful because it allows one to create a more natural environment for reading, namely a sitting position without background noise, unlike fMRI; therefore, it is less disturbing for participants, especially elderly people (Hoshi, 2007).

2. Goal and hypotheses

The aim of this study was to use NIRS techniques to evaluate the effect of aging on different levels of discourse comprehension and on the brain activity related to those levels. Two main hypotheses were formulated. First, at the behavioral level, the older participants should be less accurate at the microproposition level than the younger participants, but equally (or almost equally) accurate at the macroproposition and situation model level. Second, consistent with the CRUNCH plasticity model discussed above, the older participants would show greater hemodynamic responses in the prefrontal cortex. Differences between conditions were not expected because of the simultaneous processing of the comprehension levels.

3. Methods

This project was approved by the *Comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie Québec* (Joint Committee on Research Ethics of the Quebec Neuroimaging group).

3.1. Participants

Thirty-six adults participated in this study: 18 older adults, from 66 to 78 years old, and 18 younger adults, from 20 to 27 years old. All had university degrees (15 to 21 years of education). All were right handed, as assessed by the Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971), with a score of 80 or higher; had French as their mother tongue; and had normal or corrected vision, as assessed by the Near Vision Test Card (Snellen, 1862). Their vocabulary level was evaluated with the Mill Hill Vocabulary Scale (Deltour, 1993). Participants did not have dyslexia, diabetes, psychiatric or neurological impairments, or a history of alcoholism or drug addiction.

All older participants had a score of 26 or more on the Montreal Cognitive Assessment (MoCA; Nasreddine et al., 2005). All participants underwent a short neuropsychological testing to assess their cognitive functions, including working memory (Digit Span test; Wechsler, 1991), short-term and long-term memory (Rey Auditory Verbal Learning Test; Rey, 1970),

attention (Trail Making Test, parts A and B; Reitan and Wolfson, 1985), inhibitory control (Stroop Victoria Test; Stroop, 1935), mental flexibility (Wisconsin Card Sorting Test, 64-card version; Nelson, 1976) and processing speed (Digit Symbol; Wechsler, 1991). See the appendix for details.

3.2. Stimuli

The task is composed of 36 short stories and probe questions created by Scherer et al. (2012). The story-probe combinations were divided into three blocks evaluating the different components of the discourse comprehension model: micropropositions, macropropositions and situation model. Participants read a short story on a computer and, immediately afterward, they pressed a button to indicate whether the presented probe was true or false, according to the story they just had read. True and false answers were balanced in each condition and the order of block presentation was counterbalanced between participants. None of the stories contained metaphors, irony or indirect language. Short stories were chosen to decrease the influence of working memory on discourse comprehension by reducing the information load. All stories were equivalent regarding number of words, syllables, letters, sentences and propositions. The timeline and task design are presented in figure 1.

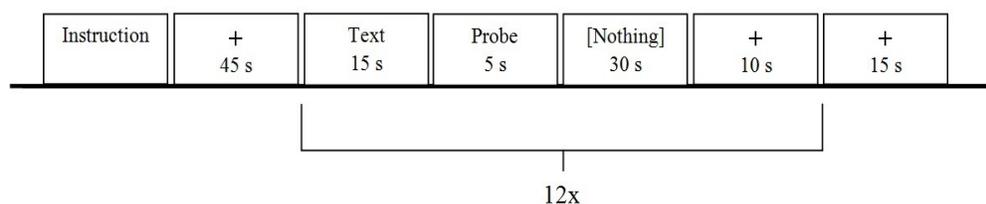


Figure 1. Timeline and task design for each block of stimuli.

Examples of three short narratives with their corresponding probes:

Microproposition level

Text: Michaël est propriétaire d'une voiture verte depuis douze ans. Il l'aime bien et l'appelle Pierrette. La voiture de Michaël est très vieille et tombe en panne. Michaël est triste parce qu'il va devoir acheter une autre voiture.

Michaël has owned a green car for twelve years. He loves it and calls it Pierrette. Michaël's car is very old and breaks down. Michaël is sad because he will need to buy another car.

Probe: La vieille voiture de Michaël est de couleur bleue. (F)

Michaël's old car is blue. (F)

Macroproposition level

Text: Joanne a l'habitude d'être malade durant ses voyages, mais aujourd'hui elle se sent bien. Soudain, la plus jeune de ses filles tombe. Heureusement, un autre touriste la ramène à bord en la tirant par son gilet de sauvetage.

Joanne usually gets sick when traveling, but today she feels well. Suddenly, her youngest daughter falls. Fortunately, another tourist pulls her back on board by grabbing her life jacket.

Probe: Joanne et sa fille sont des touristes en croisière sur un bateau. (V)

Joanne and her daughter are tourists traveling on a boat. (T)

Situation model level

Text: Marie ne parle pas couramment le français. Elle a lu une offre d'emploi de réceptionniste dans un hôtel de Montréal. Elle va à l'entrevue mais sa candidature n'est pas retenue. Marie décide de prendre des cours de français.

Marie does not speak French fluently. She has read a posting for a job as a receptionist in a Montreal hotel. She goes for the interview, but her application is not accepted. Marie decides to take French courses.

Probe: Marie étudiera le français parce qu'elle adore cette langue. (F)

Marie is going to study French because she loves the language. (F)

3.3. Procedure

During the task, participants were seated on a chair in front of a computer while wearing a NIRS headpiece. Their index fingers were placed on two buttons, one with a green "V" (for *vrai* in French, meaning 'true') and one with a red "F" (for *faux* in French, meaning 'false'). The locations of the buttons were counterbalanced among the participants. During the task, they were asked to read silently and to avoid speaking or moving. After receiving the instructions, the participants performed a practice task composed of three stories, each followed by a probe. Then, they performed the three blocks (duration of 780 s each) with a few minutes' pause after each block.

3.4. Data acquisition

Behavioral data were acquired using the E-Prime2 program (<http://www.pstnet.com/eprime.cfm>). NIRS data were acquired using a

TECHEN Continuous Wave Real-Time Systems model CW6. Ten sources and 28 detectors were distributed on each participant's head for a total of 58 channels. Each source consisted of two lasers emitting at 690 nm and 830 nm respectively. After acquisition, the channels were grouped in 16 regions of interest (ROIs) evenly distributed on each brain hemisphere. The headpiece was designed to cover brain-language regions based on the 10/20 standard. The headpiece design and relative position of sources, detectors, channels and ROIs are presented in figure 2. The headpiece was placed on the participant's head using the 10/20 international system (Jasper, 1958) as a reference. To insure reliability, for each participant, nasion-inion distance was measured and the headpiece was placed at 10% of that distance from the nasion. Other points of reference were measured to ensure good positioning of the headpiece (see figure 2). Anatomical MRI from a previous study (Amiri et al., 2014) with the same headpiece allowed us to estimate the Brodmann's Area covered by each ROI (see Table I). NIRS acquisition was performed throughout each block and trigger points were set at the beginning of each story and probes to dissociate those segments in the analyses.

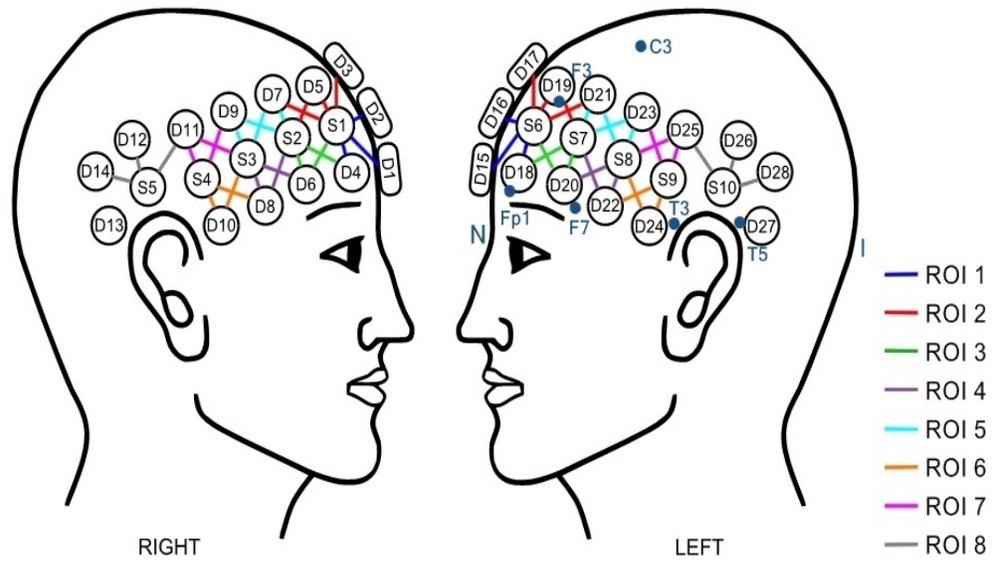


Figure 2. Positions of sources (S), detectors (D) and regions of interest (ROI).

Table I. Estimation of the Brodmann's Area covered by each region of interest.

Region of Interest	Estimated Corresponding Brodmann's Area
ROI 1	46 - Dorsolateral prefrontal cortex 10 - Frontopolar area
ROI 2	9 - Dorsolateral prefrontal cortex 44 - Pars opercularis, part of Broca's area
ROI 3	45 - Pars triangularis, part of Broca's area
ROI 4	6 - Premotor and supplementary motor cortex 48 - Retrosubicular area
ROI 5	6 - Premotor and supplementary motor cortex 43 - Subcentral area
ROI 6	21 - Middle temporal gyrus
ROI 7	22 - Superior temporal gyrus 40 - Supramarginal gyrus, part of Wernicke's area
ROI 8	37 - Fusiform gyrus

3.5. Data analysis

NIRS data were processed, normalized and analyzed using HomER2 (<http://www.nmr.mgh.harvard.edu/PMI/resources/homer2/home.htm>) – that is, Hemodynamic optically measured Evoked Response – a suite of open-source MATLAB (<http://www.mathworks.com/products/matlab/>) programs. HomER2 allows one to calculate the hemodynamic change in HbO and HbR concentrations from the raw light intensity acquired at different wavelengths with the NIRS device (Huppert et al., 2009). Channels S4-D12, S5-D10, S5-D13, S9-D26, S10-D24 and S10-D27 were recorded but excluded from the analysis because of a poor signal across most participants. Statistical analyses of the behavioral and NIRS data (mean amplitude of hemoglobin concentration's variation) were performed using SPSS software (<http://www-01.ibm.com/software/analytics/spss/>). Data distributions were normal. Thus, independent sample Student t-tests were used to compare the two groups at the behavioral level. One-way analyses of variance (ANOVAs) with a Bonferroni correction were used to compare each condition within groups for both parts of the task. Independent sample Student t-tests were used to compare mean hemoglobin (Hb) changes in each ROI between the two groups.

4. Results

4.1. Behavioral data

The sociodemographic characteristics of both groups are presented in Table II. Younger and older groups differed only in their age, since no significant differences were observed in terms of education and vocabulary levels.

Table II. Sociodemographic characteristics of the groups.

Characteristics	Younger (n = 18) Mean (SD)	Older (n = 18) Mean (SD)	t-value	P-value
Age	23.56 (1.82)	72.33 (3.73)	-49.895	.000
Gender (Male/Female)	7/11	6/12	n/a	n/a
Education	16.78 (1.11)	16.67 (1.97)	0.208	.836
Mill Hill Vocabulary Test	25.28 (3.30)	27.50 (4.61)	-1.663	.105

Student t-tests were used; significant level was set at $p \leq 0.05$. SD: Standard Deviation

Numbers of correct answers for each condition in the reading task are presented in figure 3. The younger group produced significantly more correct answers in the microproposition and situation model conditions than the older group. No significant difference was found in the macroproposition condition between the two groups. Figure 4 shows response times; it reveals that the younger group responded significantly faster than the older group to the probes in all conditions.

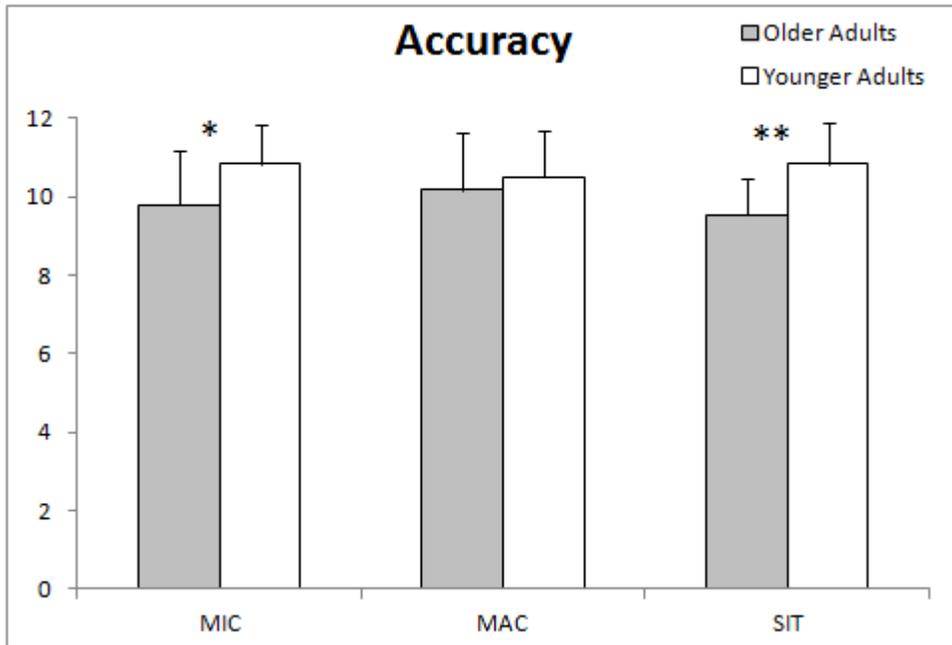


Figure 3. Accuracy in each condition (MIC: microproposition, MAC: macroproposition, SIT: situation model). Student t-test were used, significant level was set at $p \leq .05^*$; $p \leq .01^{**}$.

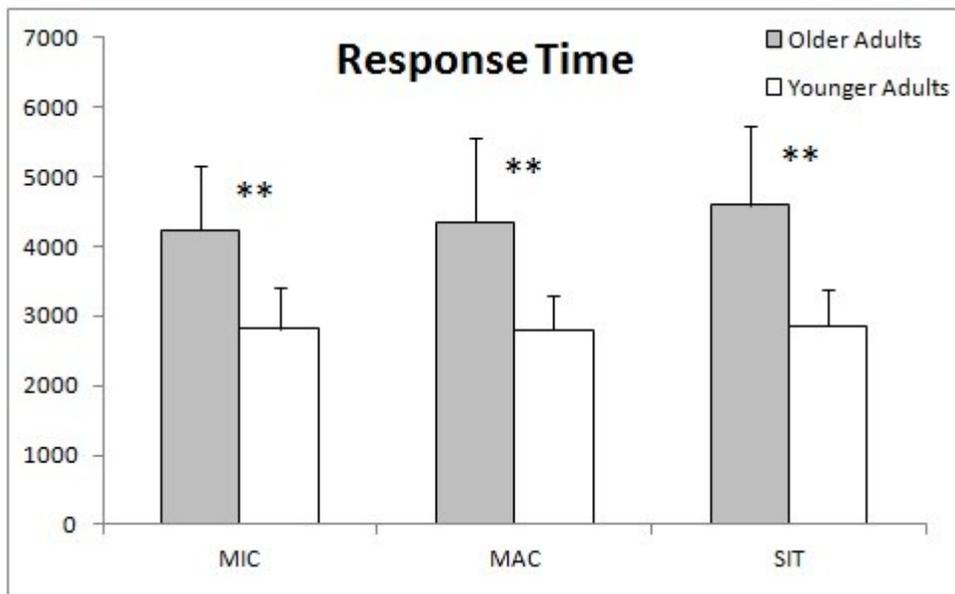


Figure 4. Response times (ms) in each condition (MIC: microproposition, MAC: macroproposition, SIT: situation model). Student t-test were used, significant level was set at $p \leq .05^*$; $p \leq .01^{**}$.

4.2. NIRS data

The grand-averaged waveforms of HbO and HbR concentrations during the reading portion of the task are shown in Figure 5 for both groups in the three conditions.

No significant differences in HbO and HbR concentration variations were found between conditions in the intragroup analysis (One-way ANOVA) during the reading portion of the task in either group. Student t-tests were performed for the intergroup analysis. Significant differences between the two groups were found in ROI 1L and 2L: the older group showed a greater and more sustained variation in HbO in all three conditions while reading the texts. Significant differences were observed for region 1L, in the microproposition ($p=.034$) and macroproposition conditions ($p=.028$), with an almost significant difference in the situation model condition ($p=.060$). For region 2L, significant differences were seen in the microproposition ($p=.021$), macroproposition ($p=.043$) and situation model conditions ($p=.015$). These regions correspond to the left dorsolateral prefrontal cortex, the left frontopolar area and part of the Broca's area.

The grand-averaged waveforms of HbO and HbR concentrations while participants answered the probe questions are presented in Figure 6 for both groups in the three conditions.

No significant differences in HbO and HbR concentration variations were found between conditions in the intragroup analysis (One-way ANOVA) during the time allowed to answer the probe in either group. As well, no significant differences in HbO and HbR concentration variations were found between the two groups (Student t-test) while they were answering the probe questions.

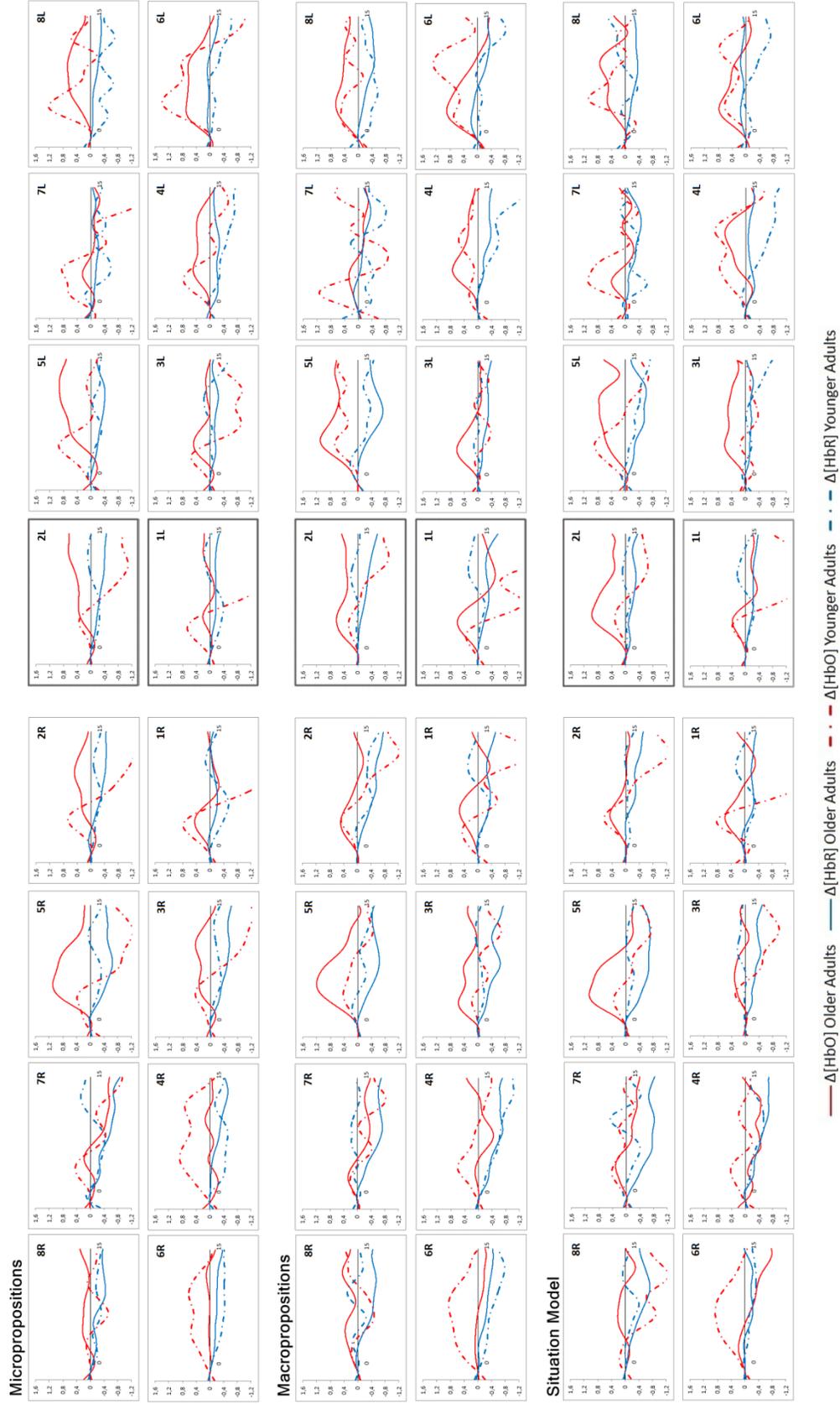


Figure 5. Grand-averaged waveforms of HbO and HbR concentrations during the reading portion of the task (15 s). Variation in hemoglobin concentration (μM) as a function of time (s). ROI with significant differences are highlighted in grey. R: Right; L: Left.

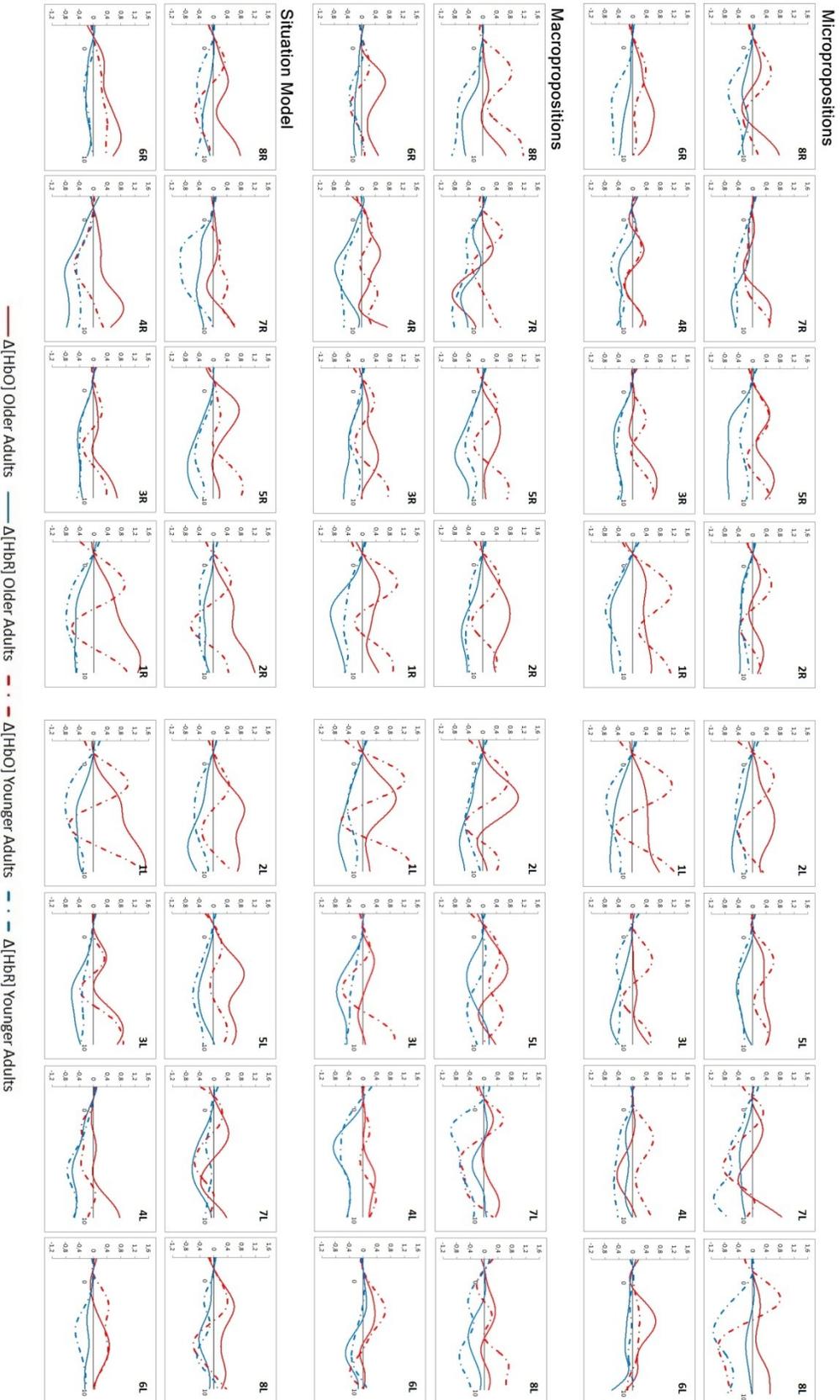


Figure 6. Grand-averaged waveforms of HbO and HbR concentrations while participants answered the probes. (10 s) Variation in hemoglobin concentration (μM) as a function of time (s). R: Right; L: Left.

5. Discussion

5.1. Differences in task accuracy

In order to reduce the influence of working memory on the older group's performance, short texts and short waiting periods between the texts and the probes were used. Nevertheless, the older group still performed less accurately than the younger group in the microproposition condition. The older adults managed to maintain equivalent accuracy to the younger group in the macroproposition condition. Similar results had been reported in the past in studies using longer texts and longer periods between reading and questions (Radvansky et al., 2001, Radvansky and Dijkstra, 2007). According to those studies, elderly participants perform better and rely more on what the text is *about* (macrostructure and situation model) than what it *is* (surface form and micropropositions). Our study tends to confirm those findings.

Since the influence of working memory was minimized, the fact that the older adults still performed worse at the microstructural level may have been because, in general, they relied less on that component of comprehension. It is possible that older adults read more efficiently and set aside information they do not need more quickly, emphasizing the gist of the story instead of assimilating the whole text. By doing this, they keep a smaller propositional network active, which is easier to process through the different cycles of

comprehension. This network is enough to build the situation model but does not allow them to retain all the details of a text. This is also in line with the better ability of younger participants to recall the verbatim of texts, especially when the time period allowed for reading is short, as they are able to correctly recall a higher percentage of propositions from a text than older participants (Morrow et al., 1992).

Another potential explanation arises from the fact that the younger group was mostly composed of individual who had stopped attending school less than five years before participating in the study. Students tend to try to retain most of the details of a text while preparing for exams and they may maintain that habit even afterward while reading for a test. This type of reading is unnecessarily tiring and resource-demanding, because retaining every detail is not useful for overall comprehension. Thus, this habit is likely to gradually disappear when an individual has not had to study for a long time. This hypothesis may also explain why younger participants seem to rely more on the microstructural level even in studies with longer texts (Radvansky et al., 2001).

Because the macroproposition block covers the gist of the text and the generalization of propositions, and because it is harder to evaluate change in the spatiotemporal framework within short texts, the situation model block covers mainly the integration and inferences aspects of the model. Integration refers to the necessity to combine two or more pieces of information, and inference

refers to the need to derive implications from the information presented (Sommers et al., 2011). Although the construction of the situation model is known to be preserved in aging (Radvansky et al., 2001, Radvansky and Dijkstra, 2007), the older adults responded less accurately in this condition than the younger ones. This difference may have arisen because this study focuses more on the integration and inference aspects. Those types of questions were reported to be harder to answer than informal questions (and inferences are harder than integration) in a study of listening comprehension (Sommers et al., 2011). However, Sommers et al. also reported that the rate of age-related decline does not differ for the three types of questions.

Moreover, McGinnis (2009) reported that older adults generate more inferences while reading and that inferential processing may be less sensitive to cognitive decline. This is consistent with the hypothesis that older adults rely more on their prior knowledge in reading comprehension to compensate for the age-related decline in resource allocation (Maury et al., 2010). In this case, to explain the unexpectedly poorer performance of the older group in the situation model condition in our study, it may be assumed that very short texts are too difficult because they do not provide enough time and redundancy of propositions to properly build a situation model. In that context, older adults may not have enough material to build a good connection with their prior knowledge. Since the situation model was not consolidated, the older participants found it more difficult to produce the inferences they needed to

answer the probes. Maybe they would even have benefited from more time between the reading of the texts and the presentation of the probes to consolidate what they had just read in a better situation model with the proper inferences.

The older adults responded significantly slower than the younger ones in all three conditions. This result was expected since many studies report that processing speed declines in aging (e.g., Salthouse, 1993, Salthouse, 1996, Feld and Sommers, 2009, Rabbitt et al., 2007). Building the microstructural network, extracting the macrostructure and updating the situation model require a lot of cycles of processing by different types of memory, as well as inhibition (Chesneau et al., 2007a, Radvansky, 1999a). Thus, a decline in processing speed in the older group may also explain the differences in accuracy. This assumption is especially likely at the microstructural level, where the network grows more and more as the person reads, making it more difficult to process. Since the macrostructure is an extract of the essential components of the microstructure, it is easier to process, with fewer propositions to carry from one cycle to the next, and therefore may be less affected by the decrease in processing speed observed in aging.

5.2. Constants and changes in hemodynamic responses in aging

The older and younger groups showed no significant differences in HbO and HbR concentration changes between the three conditions while reading and while answering the probe questions. Those results were expected since participants were not aware of the type of questions they would get after reading and answering involves retrieving information more than it depends on comprehension, which was done earlier in the process. Moreover, the levels of discourse comprehension are interconnected, simultaneous and self-directed while reading, making them nearly impossible to differentiate neuroanatomically.

No differences are observed in the temporal regions associated with discourse comprehension. In fact, while reading, both groups showed a substantial hemodynamic response in the left middle temporal gyrus (ROI 6L), which plays a role in the integration and interpretation of texts (Ferstl et al., 2008). Both groups also showed hemodynamic responses in the premotor and supplementary motor cortex (ROI 5, mainly in the left hemisphere). These regions are known to play an important role in reading aloud (Fiez and Petersen, 1998). While a person is reading aloud, some of the activation of the supplementary motor cortex is linked to the encoding of word form information, which may also be present during silent reading (Alario et al., 2006). The supplementary motor cortex is also activated when the retrieval of

verbs from memory is necessary (Wise et al., 1991). The premotor cortex is also known to be activated while reading action words silently (Hauk and Pulvermuller, 2004). Hemodynamic responses were also present, in both groups, in the left fusiform gyrus (ROI 8L), which is associated with visual word recognition and is systematically activated during reading (McCandliss et al., 2003, Dehaene and Cohen, 2011).

No differences between groups were observed in the right hemisphere. The right hemisphere is mainly associated with prosodic and pragmatic processing (Ferre et al., 2011), which was avoided in this task. Thus, a task that emphasizes those aspects of discourse comprehension may reveal a greater difference between younger and older participants. Still, both groups demonstrated right frontal region activation during the reading part of the task, which could be linked to the integration of the propositional network built while reading (Robertson et al., 2000).

Significant differences between the younger and older groups were seen mainly in the left dorsolateral prefrontal cortex, part of the left frontopolar area and part of Broca's area (ROI 1L and 2L) while reading the texts. Older adults sustained greater and longer hemodynamic responses. This difference may be due to the longer time needed to read the text or a greater need for attentional resources. The left dorsolateral prefrontal cortex had already been highlighted as a potential modulator of discourse comprehension. This region was observed

to be more active in older participants who had good reading habits, but less active when these participants answered questions about their reading (Martin et al., 2012). This over-activation may reflect compensatory strategies in older adults, who recruit more attentional resources while reading to maximize information encoding or make more efforts to properly integrate information.

Despite differences in accuracy and in response times, the older and younger adults showed no significant differences in any brain regions while answering the probe questions. Nevertheless, the younger participants showed short hemodynamic responses in the dorsolateral prefrontal cortex bilaterally while the older participants showed longer ones. This is certainly linked to the differences in response times discussed previously. Slower processes may generate more sustained hemodynamic responses, reflecting the time needed to perform the task.

5.3. Discourse comprehension and models of aging

Given that discourse comprehension is a complex but common task, it is interesting to see whether some well-known aging models may shed light on our results.

The greater brain activity described in the dorsolateral prefrontal cortex in the older adults is in line with the CRUNCH model which describes a role

for that particular region in compensation mechanisms (Reuter-Lorenz and Cappell, 2008). Thus, the greater activation observed in our study may be a sign of a compensatory mechanism in the older group to achieve good comprehension while reading the texts. The CRUNCH model also states that over-activation is not always adequate to maintain performance in aging, which was the case in two out of the three conditions in this study.

Our study does not contradict the PASA model since there was greater activation in the anterior regions, but there was no decrease in activation in the posterior region. Since our study did not cover the whole posterior brain, it is not possible to rule out the existence of PASA phenomena in discourse comprehension.

It is also not possible to draw any conclusions concerning the HAROLD model. In fact, both older and younger adults showed signs of bilateralism while executing this comprehension task. This is not surprising, since discourse comprehension is a complex task involving many cognitive processes.

5.4. Future considerations

This study compared two groups with university-level education. Older adults with a high education level are known to be generally less affected by cognitive decline. Less homogeneous groups could reveal more differences and lead to a better understanding of discourse comprehension in the elderly

population. Varying the length of the texts and the level of difficulty could also provide interesting data to help gain a better understanding of older adults' capacity for inferencing and building a situation model.

Discourse comprehension, and its changes during aging, is a vitally important subject due to its complexity and its role in preserving quality of life. Future studies should look at these changes in a more realistic task such as reading the newspaper or engaging in conversation.

6. Conclusion

This study demonstrated that while older adults find it harder to recall the microstructure (details) or the situation model (inference) of a short text, they still manage to properly recall the macrostructure (gist of discourse). In accordance with the CRUNCH model, older adults show significantly greater activation in the left dorsolateral prefrontal cortex while reading texts in all conditions, although the increased activation was not sufficient to maintain the same accuracy as younger participants in two of the conditions.

Acknowledgements

This study was supported by a grant from the Canadian Institutes of Health Research (CIHR) awarded to Y. Joannette, B. Ska and A.I. Ansaldo (2014–2017).

Appendix

Table III: Neuropsychological characteristics of the groups.

Characteristics	Younger (n = 18) Mean (SD)	Older (n = 18) Mean (SD)	t-value	P-value
Edinburgh Index	> 80%	> 80%	n/a	n/a
Near Vision Test Card	Perfect 1.2 m	Perfect 1.2 m	n/a	n/a
MoCA	n/a	28.11 (1.32)	n/a	n/a
RAVLT				
Encoding	60.56 (5.40)	49.83 (7.28)	5.018	.000
Delayed recall	13.89 (1.13)	11.00 (3.74)	3.135	.005
Stroop Victoria				
Dot – Time	10.57 (1.12)	12.62 (2.32)	-3.381	.002
Word – Time	12.04 (1.48)	16.77 (3.89)	-4.831	.000
Color – Time	16.48 (3.42)	27.57 (13.43)	-3.396	.002
Trail Making Test				
A – Time	17.51 (4.21)	34.12 (8.22)	-7.634	.000
B – Time	44.22 (13.77)	80.88 (25.77)	-5.325	.000
B–A Time	26.70 (10.78)	46.76 (24.84)	-3.143	.005
Digit Span				
Forward	11.44 (1.85)	9.83 (2.41)	2.250	.031
Backward	8.72 (2.02)	6.89 (2.52)	2.408	.022
WCST				
Categories	4.56 (0.62)	3.50 (1.20)	3.319	.003
Errors	10.06 (3.10)	14.39 (4.53)	-3.353	.002
Digit Symbol				
After 1 min	47.22 (4.85)	31.11 (6.25)	8.645	.000
After 2 min	96.28 (9.02)	63.22 (14.29)	8.302	.000
2 min – 1 min	49.06 (5.10)	32.11 (8.42)	7.304	.000
Matching	16.06 (2.67)	12.83 (2.75)	3.569	.001
Free Recall	8.39 (0.70)	7.50 (0.86)	3.411	.002

SD: Standard Deviation; MoCA: Montreal Cognitive Assessment; RAVLT: Rey Auditory Verbal Learning Test; WCST: Wisconsin Card Sorting Task

References

- ALARIO, F. X., CHAINAY, H., LEHERICY, S. & COHEN, L. (2006). The role of the supplementary motor area (SMA) in word production. *Brain Res*, 1076, 129-43.
- AMIRI, M., POULIOT, P., BONNERY, C., LECLERC, P. O., DESJARDINS, M., LESAGE, F. & JOANETTE, Y. (2014). An exploration of the effect of hemodynamic changes due to normal aging on the fNIRS response to semantic processing of words. *Front Neurol*, 5, 249.
- ANSADO, J., MONCHI, O., ENNABIL, N., FAURE, S. & JOANETTE, Y. (2012). Load-dependent posterior-anterior shift in aging in complex visual selective attention situations. *Brain Res*, 1454, 14-22.
- BREBION, G. (2003). Working memory, language comprehension, and aging: four experiments to understand the deficit. *Exp Aging Res*, 29, 269-301.
- CABEZA, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in older adults: the HAROLD model. *Psychol Aging*, 17, 85-100.
- CABEZA, R., ANDERSON, N. D., LOCANTORE, J. K. & MCINTOSH, A. R. (2002). Aging gracefully: compensatory brain activity in high-performing older adults. *Neuroimage*, 17, 1394-402.
- CAPPELL, K. A., GMEINDL, L. & REUTER-LORENZ, P. A. (2010). Age differences in prefrontal recruitment during verbal working memory maintenance depend on memory load. *Cortex*, 46, 462-73.
- CHESNEAU, S., JBABDI, S., CHAMPAGNE-LAVAU, M., GIROUX, F. & SKA, B. (2007a). [Text comprehension, cognitive resources and aging]. *Psychol Neuropsychiatr Vieil*, 5, 47-64.
- CHESNEAU, S., ROY, M.-C. & SKA, B. (2007b). [Evaluation of text comprehension based on a theoretical model]. *Revue canadienne d'orthophonie et d'audiologie*, 31, 83-93.
- DAVIS, S. W., DENNIS, N. A., DASELAAR, S. M., FLECK, M. S. & CABEZA, R. (2008). Que PASA? The posterior-anterior shift in aging. *Cereb Cortex*, 18, 1201-9.
- DEDE, G., CAPLAN, D., KEMTES, K. & WATERS, G. (2004). The relationship between age, verbal working memory, and language comprehension. *Psychol Aging*, 19, 601-16.
- DEHAENE, S. & COHEN, L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends Cogn Sci*, 15, 254-62.
- DELTOUR, J. J. (1993). *Échelle de vocabulaire de Mill Hill de J. C. Raven. Adaptation française et normes européennes du Mill Hill et du Standard*

- Progressive Matrices de Raven (PM38) [Mill-Hill vocabulary scale of J. C. Raven. French adaptation and European norms]*, Braine-le-Château, Belgium, Éditions L'application des techniques modernes.
- DENHIÈRE, G. & BAUDET, S. (1992). *Lecture, compréhension de texte et science cognitive*, Paris, Presses Universitaires de France.
- ERICSSON, K. A. & KINTSCH, W. (1995). Long-term working memory. *Psychol Rev*, 102, 211-45.
- FELD, J. E. & SOMMERS, M. S. (2009). Lipreading, processing speed, and working memory in younger and older adults. *J Speech Lang Hear Res*, 52, 1555-65.
- FERRE, P., SKA, B., LAJOIE, C., BLEAU, A. & JOANETTE, Y. (2011). Clinical focus on prosodic, discursive and pragmatic treatment for right hemisphere damaged adults: what's right? *Rehabil Res Pract*, 2011, 131820.
- FERSTL, E. C., NEUMANN, J., BOGLER, C. & VON CRAMON, D. Y. (2008). The extended language network: a meta-analysis of neuroimaging studies on text comprehension. *Hum Brain Mapp*, 29, 581-93.
- FIEZ, J. A. & PETERSEN, S. E. (1998). Neuroimaging studies of word reading. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 95, 914-21.
- GRATTON, G. & FABIANI, M. (2007). Optical imaging of brain function. In: PARASURAMAN, R. & RIZZO, M. (eds.) *Neuroergonomics: the brain at work*. Oxford & Toronto: Oxford University Press.
- HAUK, O. & PULVERMULLER, F. (2004). Neurophysiological distinction of action words in the fronto-central cortex. *Hum Brain Mapp*, 21, 191-201.
- HOSHI, Y. (2003). Functional near-infrared optical imaging: utility and limitations in human brain mapping. *Psychophysiology*, 40, 511-20.
- HOSHI, Y. (2007). Functional near-infrared spectroscopy: current status and future prospects. *J Biomed Opt*, 12, 062106.
- HUPPERT, T. J., DIAMOND, S. G., FRANCESCHINI, M. A. & BOAS, D. A. (2009). HOMER: a review of time-series analysis methods for near-infrared spectroscopy of the brain. *Appl Opt*, 48, D280-98.
- JASPER, H. (1958). Progress and problems in brain research. *J Mt Sinai Hosp N Y*, 25, 244-53.
- KINTSCH, W. (1988). The role of knowledge in discourse comprehension: a construction-integration model. *Psychol Rev*, 95, 163-82.
- KINTSCH, W. & VAN DIJK, T. A. (1978). Toward a model of text comprehension and production. *Psychological Review*, 85, 363-94.

- MADDEN, D. J. (2007). Aging and visual attention. *Curr Dir Psychol Sci*, 16, 70-4.
- MARTIN, C.-O., DESROCHERS, M., DEMERS, C., SCHERER, L. C. & SKA, B. (2012). Influence of reading habits on cerebral plasticity for discourse comprehension in aging. *Ilha do Desterro*, 101-27.
- MAURY, P., BESSE, F. & MARTIN, S. (2010). Age differences in outdated information processing during news reports reading. *Exp Aging Res*, 36, 371-92.
- MAZOYER, B. M., TZOURIO, N., FRAK, V., SYROTA, A., MURAYAMA, N., LEVRIER, O., SALAMON, G., DEHAENE, S., COHEN, L. & MEHLER, J. (1993). The cortical representation of speech. *J Cogn Neurosci*, 5, 467-79.
- MCCANDLISS, B. D., COHEN, L. & DEHAENE, S. (2003). The visual word form area: expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends Cogn Sci*, 7, 293-9.
- MCGINNIS, D. (2009). Text comprehension products and processes in young, young-old, and old-old adults. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci*, 64, 202-11.
- MORROW, D.G., LEIRER, V.O., & ALTIERI, P.A. (1992). Aging, expertise, and narrative processing. *Psychol Aging*, 7(3), 376-88.
- NASREDDINE, Z. S., PHILLIPS, N. A., BEDIRIAN, V., CHARBONNEAU, S., WHITEHEAD, V., COLLIN, I., CUMMINGS, J. L. & CHERTKOW, H. (2005). The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: a brief screening tool for mild cognitive impairment. *J Am Geriatr Soc*, 53, 695-9.
- NELSON, H. E. (1976). A modified card sorting test sensitive to frontal lobe defects. *Cortex*, 12, 313-24.
- OLDFIELD, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- PERFETTI, C. A. & FRISHKOFF, G. A. (2008). The neural bases of text and discourse processing. In: STEMMER, B. & WHITAKER, H. A. (eds.) *Handbook of the Neuroscience of Language*. London: Academic Press.
- PERRIG, W. & KINTSCH, W. (1985). Propositional and situational representations of a text. *Journal of Memory and Language*, 24, 503-18.
- RABBITT, P., MOGAPI, O., SCOTT, M., THACKER, N., LOWE, C., HORAN, M., PENDLETON, N., JACKSON, A. & LUNN, D. (2007). Effects of global atrophy, white matter lesions, and cerebral blood flow on age-related changes in speed, memory, intelligence, vocabulary, and frontal function. *Neuropsychology*, 21, 684-95.

- RADVANSKY, G. (1999a). Aging, memory and comprehension. *Curr Dir Psychol Sci*, 8, 49-53.
- RADVANSKY, G. A. (1999b). Memory retrieval and suppression: the inhibition of situation models. *J Exp Psychol Gen*, 128, 563-79.
- RADVANSKY, G. A. & COPELAND, D. E. (2004). Working memory span and situation model processing. *Am J Psychol*, 117, 191-213.
- RADVANSKY, G. A. & DIJKSTRA, K. (2007). Aging and situation model processing. *Psychon Bull Rev*, 14, 1027-42.
- RADVANSKY, G. A., ZWAAN, R. A., CUIEL, J. M. & COPELAND, D. E. (2001). Situation models and aging. *Psychol Aging*, 16, 145-60.
- REITAN, R. M. & WOLFSON, D. (1985). *The Halstead-Reitan Neuropsychological Test Battery*, Tucson, AZ, Neuropsychology Press.
- REUTER-LORENZ, P. A. & CAPPELL, K. A. (2008). Neurocognitive aging and the compensation hypothesis. *Curr Dir Psychol Sci*, 17, 177-82.
- REY, A. (1970). *L'examen clinique en psychologie*, Paris, Presses Universitaires de France.
- ROBERTSON, D. A., GERNSBACHER, M. A., GUIDOTTI, S. J., ROBERTSON, R. R., IRWIN, W., MOCK, B. J. & CAMPANA, M. E. (2000). Functional neuroanatomy of the cognitive process of mapping during discourse comprehension. *Psychol Sci*, 11, 255-60.
- RODDEN, F. A. & STEMMER, B. (2008). A Brief Introduction to Common Neuroimaging Techniques. In: STEMMER, B. & WHITAKER, H. A. (eds.) *Handbook of the Neuroscience of Language*. London: Academic Press.
- SALTHOUSE, T. A. (1993). Speed and knowledge as determinants of adult age differences in verbal tasks. *J Gerontol*, 48, P29-36.
- SALTHOUSE, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychol Rev*, 103, 403-28.
- SCHERER, L. C., FONSECA, R. P., GIROUX, F., SENHADJI, N., MARCOTTE, K., TOMITCH, L. M., BENALI, H., LESAGE, F., SKA, B. & JOANETTE, Y. (2012). Neurofunctional (re)organization underlying narrative discourse processing in aging: evidence from fNIRS. *Brain Lang*, 121, 174-84.
- SCHMALHOFER, F. & PERFETTI, C. A. (2007). Neural and behavioral indicators of integration processes across sentence boundaries. In: SCHMALHOFER, F. & PERFETTI, C. A. (eds.) *Higher level language processes in the brain: inference and comprehension processes*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- SKA, B. & DUONG, A. (2005). [Communication, discourse and dementia]. *Psychol Neuropsychiatr Vieil*, 3, 125-33.

- SNELLEN, H. (1862). *Probekbuchstaben zur Bestimmung der Sehschärfe* [*Sample letters for the determination of visual acuity*], Utrecht, Van de Weijer.
- SOMMERS, M. S., HALE, S., MYERSON, J., ROSE, N., TYE-MURRAY, N. & SPEHAR, B. (2011). Listening comprehension across the adult lifespan. *Ear Hear*, 32, 775-81.
- STRANGMAN, G., BOAS, D. A. & SUTTON, J. P. (2002). Non-invasive neuroimaging using near-infrared light. *Biol Psychiatry*, 52, 679-93.
- STROOP, J. R. (1935). Studies of interference on serial verbal reaction. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-62.
- WECHSLER, D. (1991). *Échelle clinique de mémoire de Wechsler – Révisée*, Montreal, Centre de Psychologie appliquée.
- WISE, R., HADAR, U., HOWARD, D. & PATTERSON, K. (1991). Language activation studies with positron emission tomography. *Ciba Found Symp*, 163, 218-28; discussion 228-34.

Article II. Does level of education really impact discourse comprehension in aging?

MARTIN, Charles-Olivier. PONTBRIAND-DROLET, Stéphanie. DAOUST, Valérie. YAMGA, Eric. AMIRI, Mahnoush. HÜBNER, Lilian C. SKA, Bernadette. (2016). Does level of education really impact discourse comprehension in aging? Soumis à *Behavioural Brain Research*.

Suite à l'observation des différences liées au vieillissement, le second article vise à déterminer comment le niveau d'éducation influence les capacités de compréhensions et l'activité cérébrale s'y rattachant. Pour ce faire, un groupe ayant un niveau de scolarité correspondant à un secondaire V à été comparé à un groupe ayant un niveau de scolarité universitaire. Il y apparaît que, lorsque les autres facteurs comme les habitudes de lecture et les loisirs cognitivement stimulants, sont contrôlés, l'éducation n'a pas d'influence ni sur les capacités de compréhension du discours ni sur l'activité cérébrale sous-jacente.

Charles-Olivier Martin est l'auteur principal de cet article, il était également responsable du protocole, de la collecte et du traitement des données, des analyses et de la rédaction du manuscrit. Stéphanie Pontbriand-Drolet a contribué au traitement et à l'analyse des données. Valérie Daoust et Eric Yamga ont participé au recrutement et à la passation des participants dans le cadre de stages de recherche. Manoush Amiri a été une personne ressource pour ce qui à trait à la technique d'imagerie optique. Lilian Hübner a élaboré une première version de la tâche expérimentale utilisée dans le présent protocole. Bernadette Ska a supervisé le projet en tant que directrice de thèse.

Does level of education really impact discourse comprehension in aging?

Charles-Olivier Martin^{1, 2}, Stéphanie Pontbriand-Drolet^{1, 2}, Valérie Daoust^{1,2}, Eric Yamga^{1,2}, Mahnoush Amiri^{2,3}, Lilian Cristine Hübner⁴ and Bernadette Ska^{1,2}

¹ Faculty of medicine, Université de Montréal

² Centre de Recherche, Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal, Canada

³ École Polytechnique de Montréal, Canada

⁴ Pontificia Universidade Catolica do Rio Grande do Sul

Abstract

Education is often claimed to have an effect on the changes in cognitive functions in aging. The goal of this study was to evaluate whether level of education influences discourse comprehension capacities and the related underlying brain activity. Thirty-six elderly participants (18 with a university education, 18 with a high school education) read short stories and answered probes related to microproposition, macroproposition or situation model. Using NIRS, the variation of HbO and HbR concentrations was assessed throughout the task. No differences between the two groups were found at the behavioral level or in hemodynamic responses. According to these results, education level as such does not seem to impact performance and underlying brain activity. Other factors may play a role, such as reading habits, which were controlled for in this study. Higher education may influence cognition by promoting higher cognitive habits through life, and those habits seem to have a real impact on cognition in aging.

1. Introduction

Discourse comprehension is a complex process that plays an essential role in everyday life. It has been shown that discourse comprehension changes during aging. Martin et al. (2016, submitted) found that older participants are able to properly recall the gist of texts, but they have more problems with details and inferences. With regard to cerebral activation, hemodynamic responses increased in the left prefrontal cortex while older participants read and interpret short texts. That study raised questions concerning the possible factors modulating discourse comprehension in aging. The present study investigates the influence of education level in elderly individuals' discourse comprehension.

1.1. Discourse comprehension

The construction-integration model (Kintsch and van Dijk, 1978, Kintsch, 1988) stipulates that discourse comprehension emerges from the construction of successive propositional networks integrated into previously built networks to form a cohesive whole. The textbase and the situation model are two pivotal components of this model.

The textbase corresponds to the structured, cohesive network built from the semantic propositions present in a text (Kintsch and van Dijk, 1978). Two

types of structure and propositions must be distinguished. First, microstructure and micropropositions contain all the semantic propositions of the discourse in a hierarchical network, gathering all the information and details of the text (Kintsch and van Dijk, 1978). Second, macrostructure and macropropositions, which are derived from the microstructure, form the gist of the discourse by reducing and organizing the information without losing its overall significance (Kintsch and van Dijk, 1978, Denhière and Baudet, 1992).

The situation model is the mental representation built by integrating the information from the discourse and the individual's general knowledge (Kintsch, 1988). A situation model contains events, objects and characters that are delimited in time and space. It results from inferencing capacity, relates the text to the necessary information from personal knowledge and integrates the different fragments of the discourse together (Perrig and Kintsch, 1985). In short texts, the macrostructure and the situation model tend to overlap in terms of contents and functions. For purposes of this study, the macrostructure refers to the gist and generalization of discourse, while the situation model refers to the inferences and integration needed to properly build a mental representation.

At a neuroanatomical level, the anterior temporal lobes and left middle temporal gyrus may play a role in discourse interpretation and integration (Ferstl et al., 2008, Mazoyer et al., 1993) and the prefrontal cortex, including the superior dorsomedial region, may be involved in the integration of

knowledge and inferential processes from previous part of discourse (Perfetti and Frishkoff, 2008, Schmalhofer and Perfetti, 2007).

1.2. Cognitive reserve and scaffolding theory

Two theories of cognitive aging cited education as one of the principal factor explaining the great variability often observed in elderly cohorts of participants: the cognitive reserve theory and the scaffolding theory of aging and cognition.

Cognitive reserve theory first describes the capacity of some patients to minimize the clinical manifestations normally linked to observed brain lesions (Stern, 2002, Stern, 2009). Even in normal aging, individuals with a greater cognitive reserve built up through their lifetime are expected to maintain better cognitive functions, for a longer time, than individuals with less cognitive reserve. Cognitive reserve should confer a more efficient underlying neuronal circuitry and greater neuronal flexibility, allowing people to recruit supplementary neuronal circuits to compensate for cognitive decline. Thus, cognitive reserve may explain the very variable cognitive performance found in the elderly population (Stern, 2009).

Neurocognitive scaffolding theory suggests that, when an individual is cognitively challenged, the brain activates secondary circuits that will serve as a

support, or scaffolding, for the usual circuits involved in a task (Park and Reuter-Lorenz, 2009). Those mechanisms are particularly active, and useful, in aging individuals and may explain how they are able to maintain a good level of cognitive functions despite the neuronal and structural changes that accompany aging (Park and Reuter-Lorenz, 2009). Thus, individuals who maintain higher cognitive capacities during aging are the ones who are able to generate cognitive scaffolding. Scaffolding networks associated with functions used in everyday life, such as language, are expected to be the most developed and best preserved (Park and Reuter-Lorenz, 2009). Stimulating habits of life and cognitively demanding leisure activities are possible ways of promoting cognitive scaffolding in aging populations (Park and Bischof, 2013).

The cognitive reserve and neurocognitive scaffolding theories are both influenced by similar factors. The amplitude of the cognitive reserve and the capacity to generate cognitive scaffolding are mainly influenced by an individual's education level, professional occupation, leisure activities that stimulate cognition, and physical activity (Stern, 2002, Sole-Padullés et al., 2009, Jones et al., 2010). Education level and occupation are the two major determinants of cognitive reserve (Staff et al., 2004). Individuals with a high level of education maintain good cognitive capacities the longest (Stern, 2002, Ardila et al., 2000). Education may help develop greater cognitive reserve by promoting synaptic growth or furthering the development of new cognitive strategies (Jones et al., 2010).

In discourse comprehension, elderly individuals with more education are known to perform better in discourse tasks especially in respect of metaphor and inference than those with less education (Mackenzie, 2000).

1.3. NIRS technique

Because of its totally non-invasive nature and its flexibility, which allow for the creation of a more natural environment for studies, Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) is a valuable technique for studies in elderly populations (Strangman et al., 2002, Hoshi, 2007). It is especially true in the present study where NIRS allow creating a better environment for reading than fMRI, more specifically a sitting position without background noise, which is less disturbing for participants. NIRS can be used to assess hemodynamic changes, up to 1 or 2 cm under the surface of the cortex, by measuring the alteration in the intensity of light passing through tissue provoked by changes in oxyhemoglobin (HbO) and deoxyhemoglobin (HbR) concentrations (Strangman et al., 2002, Hoshi, 2003, Gratton and Fabiani, 2007). Since brain activity leads to a hemodynamic response in local microvascularisation, it is possible to use NIRS techniques to deduce local brain activity from assessed hemodynamic changes. A normal hemodynamic response is characterized by a great increase in HbO concentration coupled with a smaller decrease in HbR concentration, followed by a return to normal (Hoshi, 2007).

2. Goal and hypotheses

The objective of the present study was to evaluate the effect of education, in an elderly population, on different levels of discourse comprehension and the brain activity related to those conditions using NIRS techniques. Two main hypotheses were made. First, at the behavioral level, participants with a university education should respond more accurately, especially in the situation model condition, where inferences and integration are needed. Second, at the neuroanatomical level, participants with a university education should show greater hemodynamic responses or activate more cerebral networks because they should possess a greater cognitive reserve and greater cognitive scaffolding capacities to adapt to the challenges of aging. Those differences may be more prominent in the prefrontal cortex regions, which are believed to play an important role in cognitive scaffolding (Park and Reuter-Lorenz, 2009), especially in the left dorsolateral prefrontal cortex region where greater hemodynamic responses were observed in an aging group than in younger participants in a comprehension task (Martin et al., 2016, submitted). Differences between conditions are not expected because of the simultaneous processing of the comprehension levels.

3. Methods

This project was approved by the *Comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie Québec* (Joint Committee on Research Ethics of the Quebec Neuroimaging group).

3.1. Participants

Thirty-six elderly adults, from 66 to 79 years old, participated in this study: 18 with a university level of education (15 to 21 years of education) and 18 with a high school level of education (11 to 13 years of education). A high school level corresponds approximately to the obligatory school attendance in the province of Quebec (ending at 16 years old). All participants spoke French as their mother tongue; were right-handed, as assessed by the Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971), with a score of 80 or higher; and had normal or corrected vision as assessed by the Near Vision Test Card (Snellen, 1862). Participants did not have psychiatric or neurological impairments, dyslexia, diabetes, or a history of alcoholism or drug addiction.

All participants scored 26 or more on the Montreal Cognitive Assessment (MoCA) (Nasreddine et al., 2005). All participants underwent a short neuropsychological testing to assess their cognitive functions, such as short-term and long-term memory (Rey Auditory Verbal Learning Test; Rey,

1970), working memory (Digit Span test; Wechsler, 1991), inhibitory control (Stroop Victoria Test; Stroop, 1935), attention (Trail Making Test, parts A and B; Reitan and Wolfson, 1985), processing speed (Digit Symbol; Wechsler, 1991) and mental flexibility (Wisconsin Card Sorting Test, 64-card version; Nelson, 1976). See appendix for details.

Participants also completed questionnaires about their hobbies and life habits in the last year (Scarmeas et al., 2003) and about their reading habits throughout their life (Wilson et al., 2003). This second questionnaire contains items about different aspects of reading (type of reading, frequency of reading, visit to the library, etc.) during five periods of participants' life. Their vocabulary level and quality were assessed using the French version of the Mill Hill vocabulary scale (Deltour, 1993).

3.2. Stimuli

The task is composed of 36 short stories and probe questions created by Scherer et al. (2012). The story-probe combinations were divided into three blocks evaluating the different components of the discourse comprehension model: micropropositions, macropropositions and situation model. The timeline and task design are presented in figure 1. Participants read a short story on a computer and, immediately afterward, they pressed a button to indicate whether the presented probe was true or false, according to the story they just had read.

True and false answers were balanced in each condition and the order of block presentation was counterbalanced between participants. None of the stories contained metaphors, irony or indirect language. All stories were equivalent regarding number of sentences, propositions, words, syllables and letters. Short stories were chosen to decrease the influence of working memory on discourse comprehension by reducing the load of information.

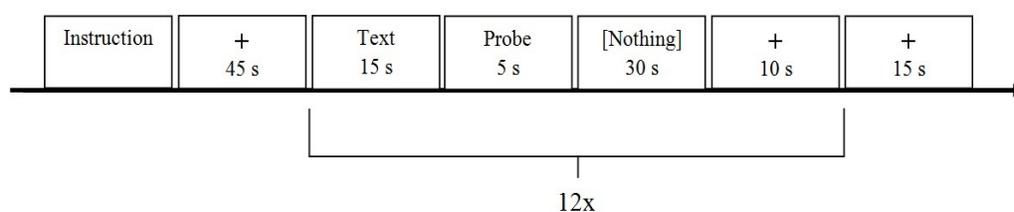


Figure 1. Timeline and task design for each block of stimuli.

Examples of three short narratives with their corresponding probes:

Microproposition level

Text: Michaël est propriétaire d'une voiture verte depuis douze ans. Il l'aime bien et l'appelle Pierrette. La voiture de Michaël est très vieille et tombe en panne. Michaël est triste parce qu'il va devoir acheter une autre voiture.

Michaël has owned a green car for twelve years. He loves it and calls it Pierrette. Michaël's car is very old and breaks down. Michaël is sad because he will need to buy another car.

Probe: La vieille voiture de Michaël est de couleur bleue. (F)

Michaël's old car is blue. (F)

Macroproposition level

Text: Joanne a l'habitude d'être malade durant ses voyages, mais aujourd'hui elle se sent bien. Soudain, la plus jeune de ses filles tombe. Heureusement, un autre touriste la ramène à bord en la tirant par son gilet de sauvetage.

Joanne usually gets sick when traveling, but today she feels well. Suddenly, her youngest daughter falls. Fortunately, another tourist pulls her back on board by grabbing her life jacket.

Probe: Joanne et sa fille sont des touristes en croisière sur un bateau. (V)

Joanne and her daughter are tourists traveling on a boat. (T)

Situation model level

Text: Marie ne parle pas couramment le français. Elle a lu une offre d'emploi de réceptionniste dans un hôtel de Montréal. Elle va à l'entrevue mais sa candidature n'est pas retenue. Marie décide de prendre des cours de français.

Marie does not speak French fluently. She has read a posting for a job as a receptionist in a Montreal hotel. She goes for the interview, but her application is not accepted. Marie decides to take French courses.

Probe: Marie étudiera le français parce qu'elle adore cette langue. (F)

Marie is going to study French because she loves the language. (F)

3.3. Procedure

During the task, participants were seated on a chair in front of a computer while wearing a NIRS headpiece. They were asked to read silently and to avoid speaking or moving. Their index fingers were placed on two buttons, one with a green "V" (for *vrai* in French, meaning 'true') and one with a red "F" (for *faux* in French, meaning 'false'). The locations of those buttons were counterbalanced among the participants. After receiving the instructions, the participants performed a practice task composed of three stories, each followed by a probe. Then, they performed the three blocks (duration of 780 s each) with a few minutes' pause after each block.

3.4. Data acquisition

Behavioral data were acquired using the E-Prime2 program (<http://www.pstnet.com/eprime.cfm>). NIRS data were acquired using a TECHEN Continuous Wave Real-Time Systems model CW6. Ten sources and 28 detectors were distributed on each participant's head for a total of 58 channels. Each source consisted of two lasers emitting at 690 nm and 830 nm respectively. The headpiece was placed on the participant's head using the 10/20 international system as a reference (Jasper, 1958). For each participant, nasion-inion distance was measured and the headpiece was placed at 10% of that distance from the nasion. Other points of reference were measured to ensure good positioning of the headpiece (see figure 2). After acquisition, channels were grouped in 16 regions of interest (ROIs) evenly distributed on each hemisphere of the brain. The headpiece was designed to cover brain-language regions based on the 10/20 standard. The headpiece design and relative position of sources, detectors, channels and ROIs are presented in figure 2. Anatomical MRI from a previous study (Amiri et al., 2014) with the same headpiece allowed us to estimate the Brodmann's Area covered by each ROI (see Table I). NIRS acquisition was performed throughout each block and trigger points were set at the beginning of each story and probes to dissociate those segments in the analyses.

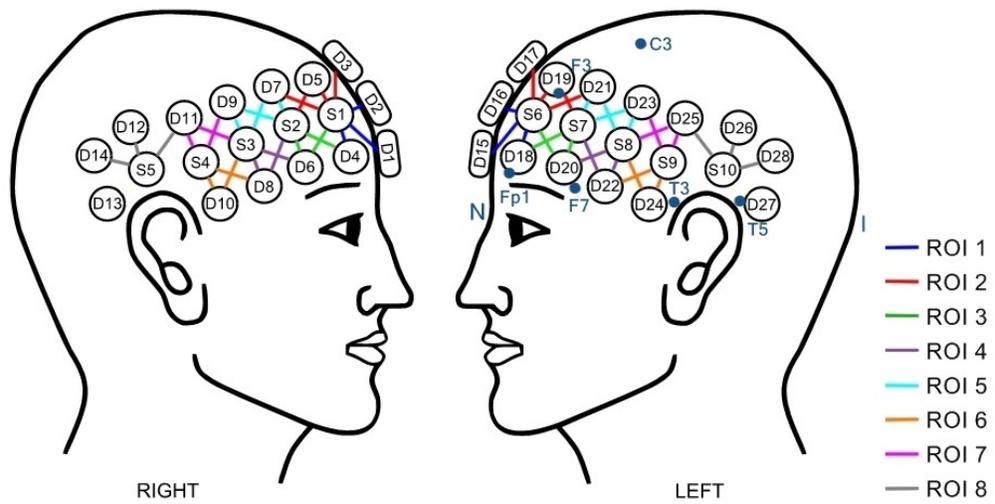


Figure 2. Positions of sources (S), detectors (D) and regions of interest (ROI).

Table I. Estimation of the Brodmann's Area covered by each region of interest.

Region of Interest	Estimated Corresponding Brodmann's Area
ROI 1	46 - Dorsolateral prefrontal cortex 10 - Frontopolar area
ROI 2	9 - Dorsolateral prefrontal cortex 44 - Pars opercularis, part of Broca's area
ROI 3	45 - Pars triangularis, Broca's area
ROI 4	6 - Premotor and supplementary motor cortex 48 - Retrosubicular area
ROI 5	6 - Premotor and supplementary motor cortex 43 - Subcentral area
ROI 6	21 - Middle temporal gyrus
ROI 7	22 - Superior temporal gyrus 40 - Supramarginal gyrus, part of Wernicke's area
ROI 8	37 - Fusiform gyrus

3.5. Data analysis

NIRS data were processed, normalized and analyzed using HomER2 (<http://www.nmr.mgh.harvard.edu/PMI/resources/homer2/home.htm>) – that is, Hemodynamic optically measured Evoked Response – a suite of open-source MATLAB (<http://www.mathworks.com/products/matlab/>) programs. HomER2 allows one to calculate the hemodynamic change in HbO and HbR concentrations from the raw light intensity acquired at different wavelengths with the NIRS device (Huppert et al., 2009). Channels S4-D12, S5-D10, S5-D13, S9-D26, S10-D24, and S10-D27 were recorded but excluded from the analysis because of a poor signal across most participants.

Statistical analyses of the behavioral and NIRS data (mean amplitude of hemoglobin concentration's variation) were performed using SPSS software (<http://www-01.ibm.com/software/analytics/spss/>). Data distributions were normal. Thus, independent sample Student t-tests were used to compare the two groups at the behavioral level. One-way analyses of variance (ANOVAs) with a Bonferroni correction were used to compare each condition within groups for both parts of the task. Independent sample Student t-tests were used to compare mean hemoglobin changes in each ROI between the two groups.

4. Results

4.1. Behavioral data

The sociodemographic characteristics of the two groups are presented in Table II. The groups differed only in the level of education achieved, as they had not significantly different age and life habits. They also had similar reading habits in adulthood although their habits differed when they were younger (figure 3). Their results on the Mill Hill Vocabulary Test were also not significantly different (table II), indicating that their reading skills were similar. Both groups performed similarly on all neuropsychological tests (see Appendix).

Table II. Sociodemographic characteristics of the groups.

Characteristics	University (n = 18) Mean (SD)	High School (n = 18) Mean (SD)	t-value	P-value
Age	72.33 (3.73)	72.78 (4.28)	-0.332	0.742
Gender (Male/Female)	6/12	4/14	n/a	n/a
Education	16.67 (1.97)	11.44 (0.71)	10.588	0.000
Life Habits	54.11 (8.35)	53.89 (8.20)	0.081	0.936
Mill Hill Vocabulary Test	25.28 (3.30)	27.50 (4.61)	-1.663	0.105

Student t-tests were used; significant level was set at $p \leq 0.05$. SD: Standard deviation

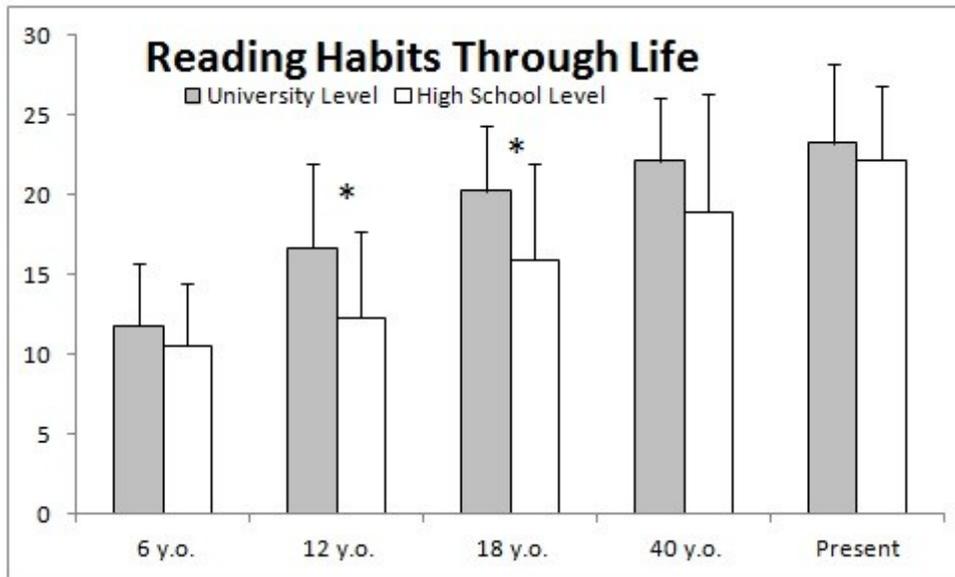


Figure 3. Reading habits through life. Y axis presents reading habits frequencies scores based on items from Wilson et al. (2003). Student t-tests were used; significant level was set at $p \leq 0.05^*$.

Numbers of correct answers for each condition in the reading task are presented in figure 4. No significant differences were found between the groups in all three conditions. Figure 5 shows response times, which were not significantly different between the groups in all conditions.

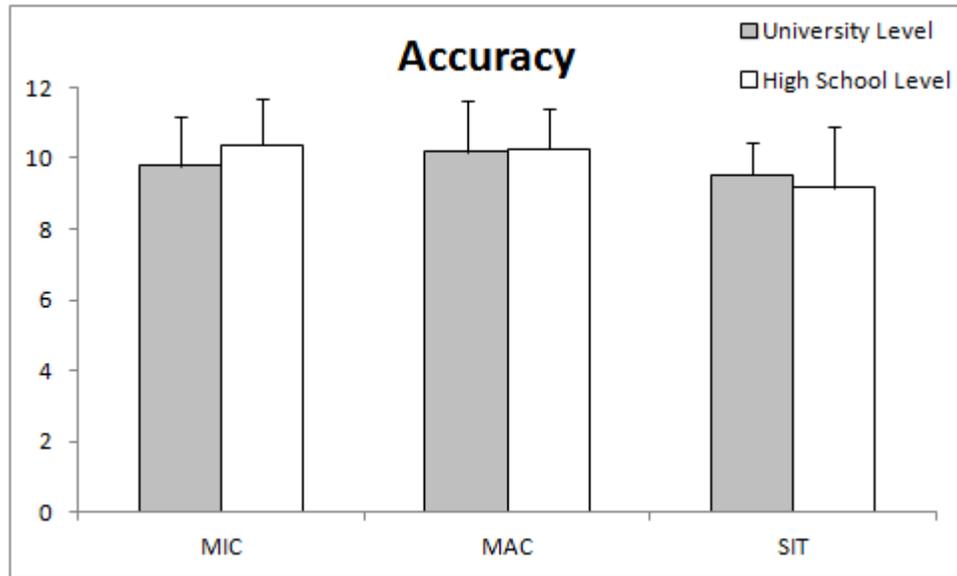


Figure 4. Accuracy in each condition (MIC: microproposition, MAC: macroproposition, SIT: situation model). Student t-tests were used; significant level was set at $p \leq 0.05$.

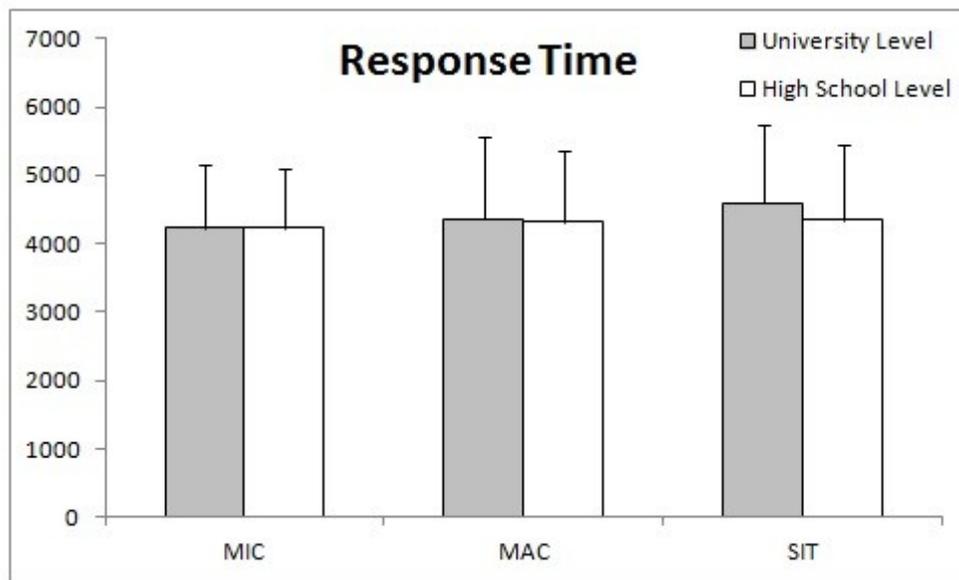


Figure 5. Response time (ms) in each condition (MIC: microproposition, MAC: macroproposition, SIT: situation model). Student t-tests were used; significant level was set at $p \leq 0.05^*$.

4.2. NIRS data

The grand-averaged waveforms of HbO and HbR concentrations while the participants were reading the text are shown in figure 6 for both groups in all three conditions. No significant differences between variations in HbO and HbR concentration were found between conditions in the intragroup analysis during the reading portion of the task in both groups (One-way ANOVA). In the intergroup analysis, no significant differences between variations in HbO and HbR concentration were found between the two groups while they were reading the texts (Student t-test).

The grand-averaged waveforms of HbO and HbR concentrations while participants answered the probe items are presented in figure 7 for both groups in the three conditions. No significant differences in HbO and HbR concentration variations were found between conditions in the intragroup analysis during the time allowed to answer the probe question in either group (One-way ANOVA). No significant differences in HbO and HbR concentration variations were found between the two groups while they were answering the probes (Student t-test).

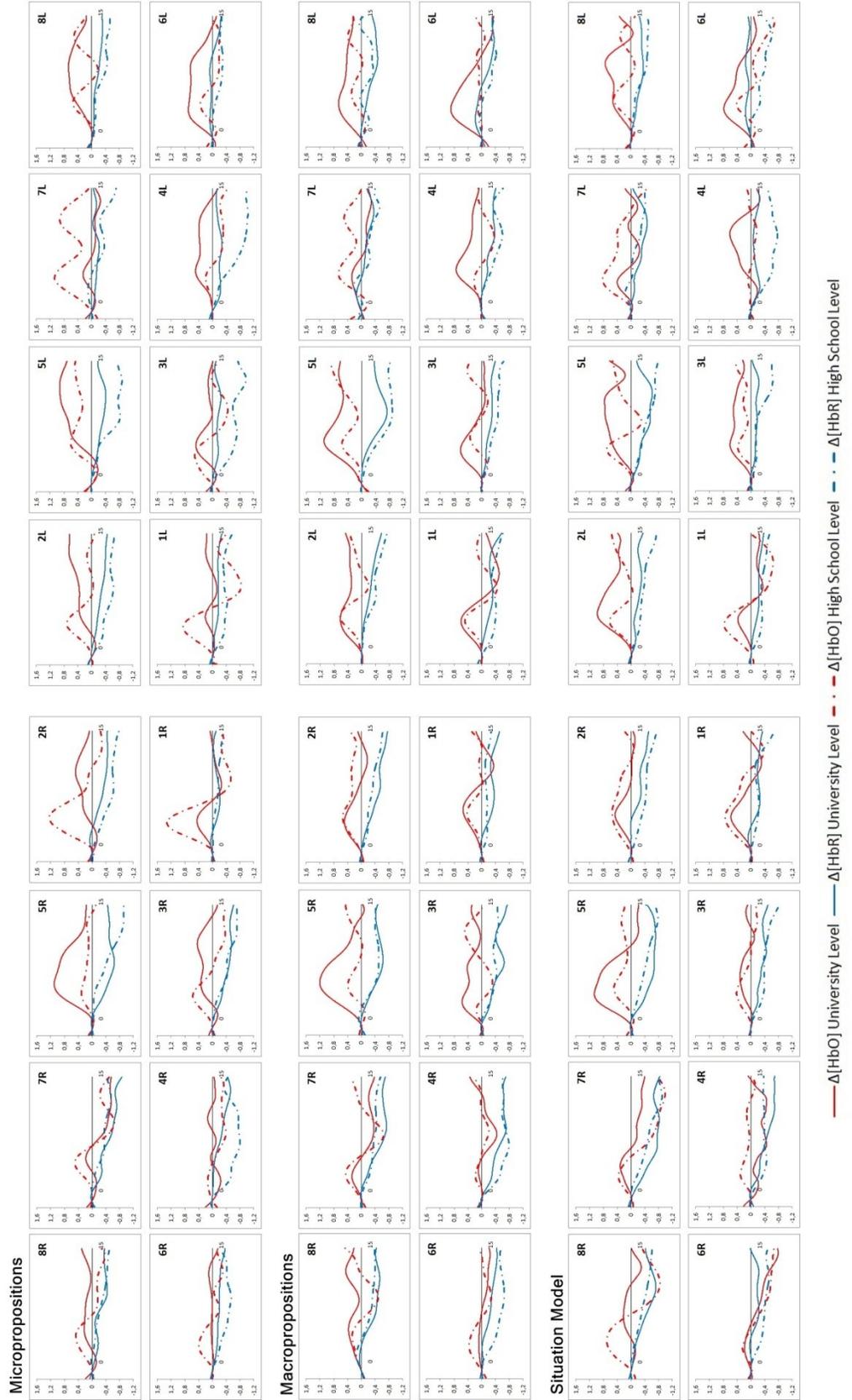


Figure 6. Grand-averaged waveforms of HbO and HbR concentrations during the reading portion of the task (15 s). Variation in hemoglobin concentration (μM) as a function of time (s). R: Right; L: Left.

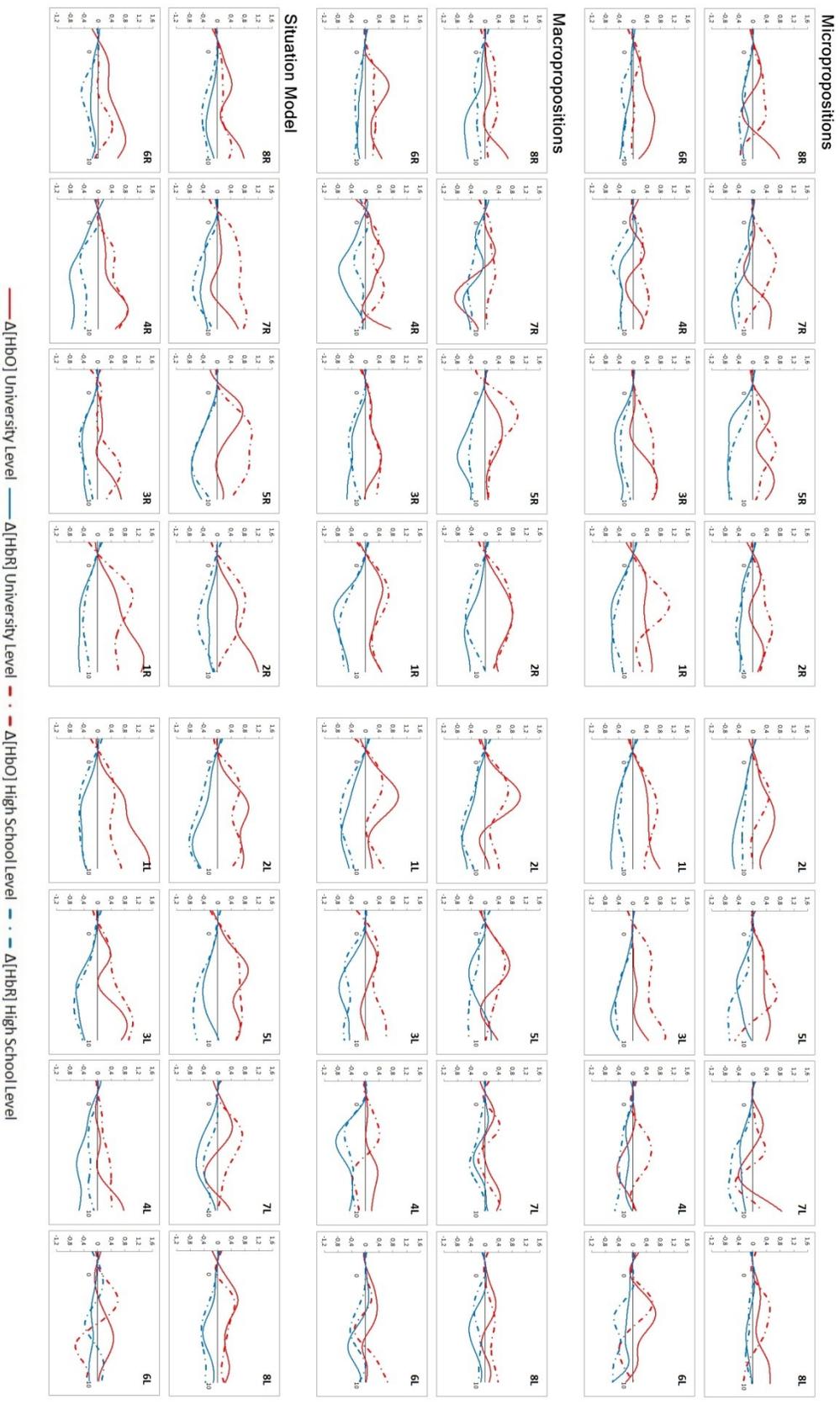


Figure 7. Grand-averaged waveforms of HbO and HbR concentrations while participants answered the probes (10 s). Variation in hemoglobin concentration (μM) as a function of time (s). R: Right; L: Left.

5. Discussion

5.1. Behavioral comparison

The assumption regarding behavior was that participants with a university education would perform more accurately in all conditions. However, no statistically significant differences were found between the participants with a university education and those with a high school education in terms of accuracy and response times in any of the three conditions. At first, those results seem surprising, especially in the situation model condition where inferences were needed. But those results make sense when the general characteristics of the groups are considered.

In fact, both groups had very strong reading habits, at least since adulthood, around the age of 40 (university-level participants had strong reading habits throughout their lives). Moreover, both groups obtained similarly high results on the French version of the Mill Hill vocabulary test. Thus, both groups had a good vocabulary, which could reflect extensive reading. In our participants, it seems that strong reading habits and good reading skills outweighed the effect of education level in a discourse comprehension task. Similar results were found in a study using an episodic memory task. Participants with a lower level of education that were engaged in cognitively stimulating activities at least once a week, were having similar performance at

the task than participants with a higher level of education (Lachman et al., 2010).

No intragroup differences were found between the three conditions. Differences might have arisen in a task using longer texts, especially in the microproposition condition, which puts more pressure on working memory by increasing the memory load with more propositions to process and bigger networks to manage.

5.2. Comparison of hemodynamic responses

Intragroup differences between the three conditions were not expected since the different levels of discourse comprehension are processed simultaneously. In the intergroup comparison, it was assumed that participants with a university education should show more signs of adaptation to the challenges of aging by activating more cerebral regions and networks or by showing greater hemodynamic responses while performing the task. The dorsolateral prefrontal cortex, especially in the left hemisphere, was expected to be the main site of those differences based on a previous study (Martin et al., 2016, submitted).

Intragroup comparison

As expected, neither group showed significant intragroup differences in HbO and HbR concentration changes between the three conditions while reading and while answering the probe items. While reading, levels of discourse comprehension are simultaneous, interconnected and self-directed, making them nearly impossible to differentiate neuroanatomically. Moreover, the participants were not aware of the type of questions they would be asked after reading. The response portion of the task involves information retrieval more than comprehension, which was performed earlier in the process. The procedure and timing of the comprehension process might explain the similarity in hemodynamic response level between the three conditions.

Intergroup comparison

No significant differences were found between the two groups while reading the texts or answering the probes in the three conditions. Both groups also performed similarly in all three conditions. Thus, they seemed to be able to put equal effort into the task, allowing them to obtain the same results. Since the groups did not differ in any respect, except education level, this result may suggest that reading habits and other cognitive habits explain their similar hemodynamic responses and performance. It may mean that education, in

isolation, is not a determinant of performance or brain plasticity, at least in a discourse comprehension task.

The prefrontal cortex is suspected to be involved in the integration of knowledge and the capacity to connect the various previous parts of the text with the one that is currently being read (Perfetti and Frishkoff, 2008, Schmalhofer and Perfetti, 2007). Differences in the left dorsolateral prefrontal region while reading were anticipated since such differences were found in a previous study comparing younger and older groups of participants with a university education (Martin et al., 2016, submitted). However, those differences were not found in this study, since both groups showed strong hemodynamic responses in the left dorsolateral prefrontal cortex (ROI 1L and 2L, see figure 6). Thus, a higher education does not seem to be a prerequisite for these kinds of changes in aging.

Both groups also showed greater hemodynamic responses in other regions linked to comprehension and reading, in particular in the left middle temporal gyrus (ROI 6L), which plays a role in the integration and interpretation of texts (Ferstl et al., 2008); the premotor and supplementary motor cortex (ROI 5), which may be linked to the reading of action words, even silently (Hauk and Pulvermuller, 2004); and the left fusiform gyrus (ROI 8L), which is involved in visual word recognition and thus is systematically activated in reading (McCandliss et al., 2003, Dehaene and Cohen, 2011).

While answering the probe questions, hemodynamic responses were observed in the prefrontal cortex, including the dorsolateral prefrontal cortex (ROI 1 and 2), which could reflect the memory retrieval demands necessary to answer the probes (Fincham and Anderson, 2006). Hemodynamic responses are also observed in the premotor and supplementary motor cortex (ROI 5), which could be linked to the anticipation and preparation of the movements needed to answer by pressing buttons (Kilavik et al., 2014).

5.3. Role of education in cognitive reserve and scaffolding

As discussed previously, education is often described as being the best predictor of cognitive reserve and cognitive scaffolding capacities. In our study, education was the only difference between the two groups. Nevertheless, both groups performed equally well on the discourse comprehension task and on the different neuropsychological tests (see Appendix), and they both showed similar patterns of hemodynamic responses. This means that education in isolation may not be the best predictor of performance in an aging population. In fact, when comparing two aging populations, it may be more advisable to take other factors into account, especially ones that may be related to the task, such as reading habits in the present case.

Cognitive life habits seem to have a greater influence on cognitive reserve than education, but since education promotes and fosters those life

habits, it is still a reliable predictor. It is possible that, once a certain level of education is reached, possibly the completion of high school, cognitive life habits are more predictive of aging outcomes. Thus, the outcomes of aging may be less predictable than originally anticipated. High cognitive functioning in aging is mainly the outcome of a cognitively stimulating life and is not predetermined by the number of years spent in school.

In the context of this study, it is possible that reading habits promote cognitive scaffolding in the field of reading and discourse comprehension. However, it is interesting to note that there is a significant difference between the two groups' reading habits when they were children and young adults, but that they have about the same reading in adulthood, around the age of 40. In fact, the high school level group only scored high for reading habits after that age. This would mean that cognitive skills can be trained and can promote scaffolding or increase the cognitive reserve, even if they are started relatively late in life and still get the same results as individuals who start those habits early in life. Those data are encouraging as they imply that it is never too late to promote cognition and brain plasticity and thereby increase the overall quality of life.

Another hypothesis concerning neurocognitive scaffolding is that the neuronal networks linked to reading and comprehension may be better developed and protected in most individuals because they are integral and

essential to communication. Given their importance, those networks may be stronger and better protected from deterioration.

5.4. Future considerations

This study examined the number of years of school attendance, but did not consider the type of education received. In the end, number of years may mean very little at least in the present project. Thus, the quality and type of education could be interesting parameters to look at in future studies. With the increase in different programs, even at the high school level, today's students are already more cognitively challenged at a younger age. There is no doubt that these programs promote a cognitively stimulating lifestyle. Consequently, their effects may be beneficial years later, laying the foundations for aging gracefully, cognitively speaking.

6. Conclusion

In a discourse comprehension task, it seems that education level, at least between the high school level – the minimum according to current Quebec laws – and the university level, does not impact performance and underlying brain activity when other factors, such as reading habits, are controlled for. Since higher education promotes better cognitive habits through life, it can still be a good predictor of cognitive reserve and neurocognitive scaffolding

capacity, but clearly other factors must also be taken into account. Other variables, such as actual cognitive habits in the last few years, may be more suitable for evaluating scaffolding or reserve capacities at a given time in aging individuals.

Acknowledgements

This study was supported by a grant from the Canadian Institutes of Health Research (CIHR) awarded to Y. Joannette, B. Ska and A.I. Ansaldo (2014–2017).

Appendix

Table III: Neuropsychological characteristics of the groups.

Characteristics	University (n = 18) Mean (SD)	High School (n = 18) Mean (SD)	t-value	P-value
Edinburgh Index	> 80%	> 80%	n/a	n/a
Near Vision Test Card	Perfect 1.2 m	Perfect 1.2 m	n/a	n/a
MoCA	28.11 (1.32)	28.17 (1.62)	-0.113	0.911
RAVLT				
Encoding	49.83 (7.28)	48.11 (8.35)	0.660	0.514
Delayed recall	11.00 (3.74)	10.06 (2.84)	0.853	0.400
Stroop Victoria				
Dot – Time	12.62 (2.32)	10.95 (1.76)	2.396	0.022
Word – Time	16.77 (3.89)	15.69 (2.28)	0.995	0.327
Color – Time	27.57 (13.43)	27.25 (6.57)	0.090	0.929
Trail Making Test				
A – Time	34.12 (8.22)	33.46 (11.34)	0.202	0.841
B – Time	80.88 (25.77)	77.54 (26.14)	0.386	0.702
B–A Time	46.76 (24.84)	44.08 (19.39)	0.360	0.721
Digit Span				
Forward	9.83 (2.41)	9.72 (2.35)	0.140	0.889
Backward	6.89 (2.52)	7.22 (2.51)	-0.398	0.693
WCST				
Categories	3.50 (1.20)	3.00 (1.23)	1.231	0.227
Errors	14.39 (4.53)	18.44 (7.40)	-1.984	0.055
Digit Symbol				
After 1 min	31.11 (6.25)	32.28 (4.68)	-0.634	0.530
After 2 min	63.22 (14.29)	66.06 (9.18)	-0.708	0.484
2 min – 1 min	32.11 (8.42)	33.78 (5.11)	-0.718	0.478
Matching	12.83 (2.75)	9.78 (4.81)	2.340	0.027
Free Recall	7.50 (0.86)	6.83 (0.86)	2.332	0.026

SD: Standard Deviation; MoCA: Montreal Cognitive Assessment; RAVLT: Rey Auditory Verbal Learning Test; WCST: Wisconsin Card Sorting Task

References

- AMIRI, M., POULIOT, P., BONNERY, C., LECLERC, P. O., DESJARDINS, M., LESAGE, F. & JOANETTE, Y. (2014). An exploration of the effect of hemodynamic changes due to normal aging on the fNIRS response to semantic processing of words. *Front Neurol*, 5, 249.
- ARDILA, A., OSTROSKY-SOLIS, F., ROSSELLI, M. & GOMEZ, C. (2000). Age-related cognitive decline during normal aging: the complex effect of education. *Arch Clin Neuropsychol*, 15, 495-513.
- CHESNEAU, S., JBABDI, S., CHAMPAGNE-LAVAU, M., GIROUX, F. & SKA, B. (2007). [Text comprehension, cognitive resources and aging]. *Psychol Neuropsychiatr Vieil*, 5, 47-64.
- DEHAENE, S. & COHEN, L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends Cogn Sci*, 15, 254-62.
- DELTOUR, J. J. (1993). *Échelle de vocabulaire de Mill Hill de J. C. Raven. Adaptation française et normes européennes du Mill Hill et du Standard Progressive Matrices de Raven (PM38) [Mill-Hill vocabulary scale of J. C. Raven. French adaptation and European norms]*, Braine-le-Château, Belgium, Éditions L'application des techniques modernes.
- DENHIÈRE, G. & BAUDET, S. (1992). *Lecture, compréhension de texte et science cognitive*, Paris, Presses Universitaires de France.
- ERICSSON, K. A. & KINTSCH, W. (1995). Long-term working memory. *Psychol Rev*, 102, 211-45.
- FERSTL, E. C., NEUMANN, J., BOGLER, C. & VON CRAMON, D. Y. (2008). The extended language network: a meta-analysis of neuroimaging studies on text comprehension. *Hum Brain Mapp*, 29, 581-93.
- FINCHAM, J. M. & ANDERSON, J. R. (2006). Distinct roles of the anterior cingulate and prefrontal cortex in the acquisition and performance of a cognitive skill. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 103, 12941-6.
- GRATTON, G. & FABIANI, M. (2007). Optical imaging of brain function. In: PARASURAMAN, R. & RIZZO, M. (eds.) *Neuroergonomics: the brain at work*. Oxford & Toronto: Oxford University Press.
- HAUK, O. & PULVERMULLER, F. (2004). Neurophysiological distinction of action words in the fronto-central cortex. *Hum Brain Mapp*, 21, 191-201.
- HOSHI, Y. (2003). Functional near-infrared optical imaging: utility and limitations in human brain mapping. *Psychophysiology*, 40, 511-20.

- HOSHI, Y. (2007). Functional near-infrared spectroscopy: current status and future prospects. *J Biomed Opt*, 12, 062106.
- HUPPERT, T. J., DIAMOND, S. G., FRANCESCHINI, M. A. & BOAS, D. A. (2009). HomER: a review of time-series analysis methods for near-infrared spectroscopy of the brain. *Appl Opt*, 48, D280-98.
- JASPER, H. (1958). Progress and problems in brain research. *J Mt Sinai Hosp N Y*, 25, 244-53.
- JONES, R. N., FONG, T. G., METZGER, E., TULEBAEV, S., YANG, F. M., ALSOP, D. C., MARCANTONIO, E. R., CUPPLES, L. A., GOTTLIEB, G. & INOUE, S. K. (2010). Aging, brain disease, and reserve: implications for delirium. *Am J Geriatr Psychiatry*, 18, 117-27.
- KILAVIK, B. E., CONFAIS, J. & RIEHLE, A. (2014). Signs of timing in motor cortex during movement preparation and cue anticipation. *Adv Exp Med Biol*, 829, 121-42.
- KINTSCH, W. (1988). The role of knowledge in discourse comprehension: a construction-integration model. *Psychol Rev*, 95, 163-82.
- KINTSCH, W. & VAN DIJK, T. A. (1978). Toward a model of text comprehension and production. *Psychol Rev*, 85, 363-94.
- LACHMAN, M. E., AGRIGOROEI, S., MURPHY, C. & TUN, P. A. (2010). Frequent cognitive activity compensates for education differences in episodic memory. *Am J Geriatr Psychiatry*, 18, 4-10.
- MACKENZIE, C. (2000). The relevance of education and age in the assessment of discourse comprehension. *Clin Linguist Phon*, 14, 151-161.
- MARTIN, C.-O., PONTBRIAN-DROLET, S., DAOUST, V., YAMGA, E., AMIRI, M., HÜBNER, L. C. & SKA, B. (2015). Narrative discourse in young and old adults: behavioral and NIRS analyses. Submitted to *Brain and Behaviour*.
- MAZOYER, B. M., TZOURIO, N., FRAK, V., SYROTA, A., MURAYAMA, N., LEVRIER, O., SALAMON, G., DEHAENE, S., COHEN, L. & MEHLER, J. (1993). The cortical representation of speech. *J Cogn Neurosci*, 5, 467-79.
- MCCANDLISS, B. D., COHEN, L. & DEHAENE, S. (2003). The visual word form area: expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends Cogn Sci*, 7, 293-9.
- NASREDDINE, Z. S., PHILLIPS, N. A., BEDIRIAN, V., CHARBONNEAU, S., WHITEHEAD, V., COLLIN, I., CUMMINGS, J. L. & CHERTKOW, H. (2005). The Montreal Cognitive Assessment, MoCA:

- a brief screening tool for mild cognitive impairment. *J Am Geriatr Soc*, 53, 695-9.
- NELSON, H. E. (1976). A modified card sorting test sensitive to frontal lobe defects. *Cortex*, 12, 313-24.
- OLDFIELD, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- PARK, D. C. & BISCHOF, G. N. (2013). The aging mind: neuroplasticity in response to cognitive training. *Dialogues Clin Neurosci*, 15, 109-19.
- PARK, D. C. & REUTER-LORENZ, P. (2009). The adaptive brain: aging and neurocognitive scaffolding. *Annu Rev Psychol*, 60, 173-96.
- PERFETTI, C. A. & FRISHKOFF, G. A. (2008). The neural bases of text and discourse processing. In: STEMMER, B. & WHITAKER, H. A. (eds.) *Handbook of the Neuroscience of Language*. London: Academic Press.
- PERRIG, W. & KINTSCH, W. (1985). Propositional and situational representations of a text. *Journal of Memory and Language*, 24, 503-18.
- RADVANSKY, G. A. (1999). Memory retrieval and suppression: the inhibition of situation models. *J Exp Psychol Gen*, 128, 563-79.
- RADVANSKY, G. A. & COPELAND, D. E. (2004). Working memory span and situation model processing. *Am J Psychol*, 117, 191-213.
- RADVANSKY, G. A. & DIJKSTRA, K. (2007). Aging and situation model processing. *Psychon Bull Rev*, 14, 1027-42.
- RADVANSKY, G. A., ZWAAN, R. A., CURIEL, J. M. & COPELAND, D. E. (2001). Situation models and aging. *Psychol Aging*, 16, 145-160.
- REITAN, R. M. & WOLFSON, D. (1985). *The Halstead-Reitan neuropsychological test battery*, Tucson, AZ, Neuropsychology Press.
- REY, A. (1970). *L'examen clinique en psychologie*, Paris, Presses Universitaires de France.
- SCARMEAS, N., ZARAHN, E., ANDERSON, K. E., HABECK, C. G., HILTON, J., FLYNN, J., MARDER, K. S., BELL, K. L., SACKEIM, H. A., VAN HEERTUM, R. L., MOELLER, J. R. & STERN, Y. (2003). Association of life activities with cerebral blood flow in Alzheimer disease: implications for the cognitive reserve hypothesis. *Arch Neurol*, 60, 359-65.
- SCHERER, L. C., FONSECA, R. P., GIROUX, F., SENHADJI, N., MARCOTTE, K., TOMITCH, L. M., BENALI, H., LESAGE, F., SKA, B. & JOANETTE, Y. (2012). Neurofunctional (re)organization underlying narrative discourse processing in aging: evidence from fNIRS. *Brain Lang*, 121, 174-84.
- SCHMALHOFER, F. & PERFETTI, C. A. (2007). Neural and behavioral indicators of integration processes across sentence boundaries. In:

- SCHMALHOFER, F. & PERFETTI, C. A. (eds.) *Higher level language processes in the brain: inference and comprehension processes*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- SNELLEN, H. (1862). *Probebuchstaben zur Bestimmung der Sehschärfe* [Sample letters for the determination of visual acuity], Utrecht, Van de Weijer.
- SOLE-PADULLES, C., BARTRES-FAZ, D., JUNQUE, C., VENDRELL, P., RAMI, L., CLEMENTE, I. C., BOSCH, B., VILLAR, A., BARGALLO, N., JURADO, M. A., BARRIOS, M. & MOLINUEVO, J. L. (2009). Brain structure and function related to cognitive reserve variables in normal aging, mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Neurobiol Aging*, 30, 1114-24.
- STAFF, R. T., MURRAY, A. D., DEARY, I. J. & WHALLEY, L. J. (2004). What provides cerebral reserve? *Brain*, 127, 1191-9.
- STERN, Y. (2002). What is cognitive reserve? Theory and research application of the reserve concept. *J Int Neuropsychol Soc*, 8, 448-60.
- STERN, Y. (2009). Cognitive reserve. *Neuropsychologia*, 47, 2015-28.
- STRANGMAN, G., BOAS, D. A. & SUTTON, J. P. (2002). Non-invasive neuroimaging using near-infrared light. *Biol Psychiatry*, 52, 679-93.
- STROOP, J. R. (1935). Studies of interference on serial verbal reaction. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- WECHSLER, D. (1991). *Échelle clinique de mémoire de Wechsler – Révisée*, Montreal, QC, Centre de Psychologie appliquée.
- WILSON, R., BARNES, L. & BENNETT, D. (2003). Assessment of lifetime participation in cognitively stimulating activities. *J Clin Exp Neuropsychol*, 25, 634-42.

**Article III. Influence of Reading Habits on Cerebral Plasticity
for Discourse Comprehension in Aging**

MARTIN, Charles-Olivier. DESROCHERS, Marianne. DEMERS, Catrine.
SCHERER, Lilian C. SKA, Bernadette. (2012). Influence of Reading Habits on
Cerebral Plasticity for Discourse Comprehension in Aging. *Reading and the
Brain, Journal Ilha do Desterro: a Journal of English Language, Literatures in
English and Cultural Studies*, (63): 101-127.

Le troisième article présente une ouverture sur l'impact potentiel des habitudes de vie liées à une tâche de compréhension, dans ce cas-ci les habitudes de lecture. Il y a appert que les personnes lisant beaucoup tout au cours de leur vie avaient une plus grande activité cérébrale dans le cortex dorsolatéral préfrontal gauche lorsqu'ils lisaient le texte, mais qu'ils avaient une activité cérébrale moindre dans la même région lorsqu'ils récupéraient l'information pour répondre aux affirmations comparativement aux personnes ayant des habitudes de lecture moins assidues au cours de leur vie. Cependant, ces résultats n'ont pas pu être reproduits avec les données acquises plus récemment, ce qui sera abordé dans la discussion générale de cette thèse.

Charles-Olivier Martin est l'auteur principal de cet article, il était également responsable des analyses et de la rédaction du manuscrit. Il a participé à la collecte de toutes les données et à leur traitement en collaboration avec Catrine Demers qui a utilisé une autre partie des données collectées pour son mémoire de maîtrise. Marianne Desrochers a collaboré aux analyses dans le cadre d'un stage de recherche. Lilian Scherer a élaboré une première version de la tâche expérimentale utilisée dans le présent protocole. Bernadette Ska a supervisé le projet en tant que directrice de thèse.

Influence of reading habits on cerebral plasticity for discourse comprehension in aging

Charles-Olivier Martin¹, Marianne Desrochers¹, Catrine Demers¹, Lilian C. Scherer², and Bernadette Ska¹.

1 Université de Montréal (UdeM), Faculty of medicine; Centre de Recherche, Institut universitaire de gériatrie de Montréal (CRIUGM), Canada

2 Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul (PUCRS), Brazil, Linguistics Department

Abstract

The goal of this study was to evaluate the influence of reading habits on cerebral plasticity in the performance of a discourse comprehension task in aging. The main hypothesis was that participants with higher frequency and quality of reading habits should exhibit reduced brain activity because the task should be easier for them. Two groups of native French speakers, 16 young adults and 16 elderly adults, participated in a task using the NIRS (near-infrared spectroscopy) technique. They read short stories and answered true or false probes after each one. They also completed a questionnaire about their previous reading habits. The results show that the more experienced readers had higher activation in the superior left region of the prefrontal cortex while they were reading the stories but lower activation in the same region when they were retrieving the information to answer the probe. Thus, more effort is required to acquire and maintain the information needed to answer, and this effort makes it easier to give the answer. These results reinforce the hypothesis that brain plasticity is promoted by cognitive activities throughout the lifespan.

1. Introduction

Discourse, in both the oral and written modality, is the basis of human communication. Discourse comprehension, which may appear to be an automatic component of language, is actually very complex from the perspective of cerebral functioning. Like other components of cognition, discourse comprehension changes with aging. The goal of this study is to evaluate the influence of reading habits on discourse comprehension mechanisms in the aging brain.

1.1. Discourse comprehension

To understand a text, it is necessary to build a mental representation based on previous linguistic and conceptual knowledge and on the elements of the text (Kintsch, 1988). Discourse comprehension is strongly linked to many cognitive functions such as working memory, long-term memory, information processing and inference drawing (Chesneau, Jbabdi, Champagne-Lavau, Giroux, & Ska, 2007).

According to Kintsch's (1988) model, comprehension requires four levels of representation: linguistic level, textbase or conceptual level, structure, and situation model. This study will consider the textbase and situation model levels.

The textbase model comprises the whole set of semantic propositions or semantic units. There are two types of propositions: micropropositions and macropropositions. Micropropositions refer to all the details of a text, reflecting local information in the text, while macropropositions refer to the global information contained in the text (Kintsch & van Dijk, 1978).

The situation model is a mental construction generated by the integration of information in the text with the reader's acquired knowledge (Radvansky, 1999). It is the result of inferences about characters, actions and events described in the text (Radvansky, Zwaan, Curiel, & Copeland, 2001; Van Dijk & Kintsch, 1983). This mental construction of a model leads to text comprehension (Radvansky & Dijkstra, 2007).

In the construction-integration model (Kintsch, 1988), propositions first enter short-term memory. Then, they are reorganized or replaced by new entries and integrated into the proposition network. This network is updated at each new comprehension cycle. Thus, the textbase level depends mainly on short-term memory. The situation model is built at the end of each construction-integration cycle from this small network of propositions. The temporary situation model is then placed in episodic memory (Chesneau, 2007). However, knowledge stored in the reader's long-term memory may interfere with the information in the situation model. On the other hand, the global coherence of a text is supported by long-term working memory, which maintains information

retrieval and processing (Ericsson & Kintsch, 1995). Consequently, the situation model is the result of a complex interaction between working memory, episodic memory, long-term memory and long-term working memory.

1.2. Cerebral plasticity

Aging is a process that modifies cognitive functioning, especially memory, executive functions and processing speed (Craik & Salthouse, 2000; Salthouse, 1996). However, the aging effect is not homogeneous and inter-subject and inter-function differences may appear. The brain has a capacity to adapt, which makes it able to overcome a partial loss of cognitive efficiency caused by lesions or aging. For example, some patients suffering from aphasia recover almost all of their language capacity because of the increased involvement of the right hemisphere in language processing, the recruitment of new networks in the left hemisphere, and the partial repair of damaged networks (Cao, Vikingstad, George, Johnson, & Welch, 1999). Many models, such as the HAROLD (Hemispheric Asymmetry Reduction in Older Adults) model (Cabeza, 2002) and the PASA (Posterior-Anterior Shift in Aging) model (Davis, Dennis, Daselaar, Fleck, & Cabeza, 2008), and theories such as cognitive reserve (Stern, 2002) and the Scaffolding Theory of Aging and Cognition (STAC) (Park & Reuter-Lorenz, 2009), try to explain how the brain adapts to the challenge of lesions or aging.

The cognitive reserve theory deals with the incongruity often observed between the degree of brain damage and its clinical manifestations (Stern, 2009). Depending on their cognitive reserve, among other factors, two patients with the same cerebral lesions or pathology may not demonstrate the same cognitive loss. Similarly, two elderly adults will age differently, retaining different cognitive abilities. The cognitive reserve theory suggests that the brain actively compensates for lesions. Therefore, when cerebral networks usually dedicated to a particular task are damaged, the brain compensates by using other available networks not usually used for that specific task (Stern, 2002).

These networks are built and maintained throughout the lifespan. They are highly influenced by education level, occupation, intelligence, and leisure activities that stimulate cognition (Sole-Padullés et al., 2009). In fact, cognition stimulated by leisure activities may have protective effects by decreasing the atrophy of certain brain regions, even if they are started at an advanced age (Jones et al., 2010).

The STAC theory describes scaffolding as a normal process, through the lifespan, involving the development or use of complementary or alternative neural circuits to compensate for certain aging effects (Park & Reuter-Lorenz, 2009). The major difference between the cognitive reserve theory and the STAC is that cognitive reserve prevents cognitive losses, while scaffolding

seems to be a response to those losses. The scaffolding theory describes the brain's ability to build new networks when the usual ones are impaired.

Many factors facilitate the building of new networks in aging. Among other things, training (Fincham & Anderson, 2006; Wolinsky et al., 2010), physical activities (Lemaire & Bherer, 2005) and leisure activities (Sole-Padulles et al., 2009) may enhance performance in aging, even on tasks that depend on memory and executive functions.

1.3. Reading habits

Reading is considered to be an intellectual activity that contributes to building cognitive reserve or scaffolding support. However, it has mainly been studied as a type of leisure activity that could have a beneficial effect on cerebral plasticity in aging. In fact, reading may have several goals, but here we will consider reading for any purpose. In this study, reading was considered separately from other activities since it may have a greater effect on language tasks such as discourse comprehension because it is dependent on language. Moreover, the importance of reading habits for cognitive development and maintenance, as well as to retard neuropsychological aging, which may develop into mild cognitive impairment or dementia, is now well established in the literature (Parente, Fonseca, & Scherer, 2008; Schaie, 2008). A study with a group of subjects aged more than 65 years old concludes that reading habits are

a protective factor against cognitive impairment, such as dementia, and that this protective effect is greater in frequent readers, as shown by a logistic regression (Esteve & Gil, 2012). Despite those proofs of the importance of reading habits in healthy aging, no studies had previously investigated their influence on brain activity.

1.4. NIRS

The present study uses the Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) technique. Near-infrared light penetrates organic tissues without being absorbed in the range of 680 to 1000 nm (Gratton & Fabiani, 2007). The NIRS technique measures hemodynamic changes in the brain by looking at the variation in concentration of two chromophores (light-absorbing molecules): oxyhemoglobin (HbO) and deoxyhemoglobin (HbR) (Hoshi, 2007). Their respective concentrations are calculated by interpreting the quantity of light detected at the exit from the head with the modified Beer-Lambert Law. The changes in light detection match the changes in the concentration of these chromophores, because the light ray's diffusion in the tissue is considered to be constant (Strangman, Boas, & Sutton, 2002).

2. Goal and hypotheses

The goal of this study is to evaluate the influence of reading habits on cerebral plasticity, as assessed by NIRS, during a discourse comprehension task. Four hypotheses underlie the study. First, participants with stronger reading habits in terms of quantity and quality should get better results when evaluating the situation model but the same results for micropropositions and macropropositions as readers with weaker reading habits. Indeed, the situation model calls for more in-depth information processing, linked to episodic and semantic memory, while the textbase depends more on short-term memory (Chesneau, 2007). Stronger reading habits should have a greater training effect when a higher level of comprehension is needed. The second hypothesis made in this study was that participants with stronger reading habits should have faster reaction times because training should speed up the retrieval of information, as it does in the case of other cognitive functions (Wolinsky et al., 2010). Third, participants with stronger reading habits should show less cerebral activity because the task should be easier for them due to the training effect (Fincham & Anderson, 2006). This decrease due to practice has been found in many cognitive tasks, especially ones referring to working memory (Kelly & Garavan, 2005). Fourth, given that reading habits are considered as contributing to cognitive reserve, and thus helping to reduce the cognitive decline in aging, the effects of strong reading habits should be more evident in

the elderly group. Thus, greater correlations between reading habits and brain activity should be observed in this group (Stern, 2009).

3. Methods

3.1. Participants

Thirty-two adults participated in this study: 16 elderly adults, from 62 to 75 years old, and 16 young adults, from 20 to 25 years old. All had university degrees (15 to 21 years of education). All were right-handed, as assessed by the Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) with a score of 80 or higher; had French as their mother tongue; and had normal or corrected vision. They did not have dyslexia, diabetes, psychiatric or neurological impairments, or a history of alcoholism or drug addiction.

All elderly participants had a score of 27 or more on the Mini-Mental State Evaluation (MMSE) (Folstein, Folstein, & McHugh, 1975). No participant had impaired cognitive functions such as attention (Trail Making Test, parts A and B) (Reitan & Wolfson, 1985), inhibitory control (Stroop Victoria Test) (Stroop, 1935), short-term and long-term memory (Buschke Selective Reminding Test) (Buschke, 1973), working memory (Digit Span test) (Wechsler, 1991), and mental flexibility (Wisconsin Card Sorting Test, 64-card version) (Nelson, 1976). These data are displayed in Table I.

Table I. Characteristics of the participants.

	Younger group 10 women; 6 men M (SD)	Older group 14 women; 2 men M (SD)
Age**	22.4 (2.7)	68.0 (4.1)
Education	16.3 (1.7)	17.3 (2.1)
MMSE	n/a	29.3 (0.7)
Buschke Selective Reminding test		
Encoding**	40.4 (2.8)	35.3 (5.9)
Delayed recall*	15.2 (1.0)	13.7 (2.4)
Stroop Victoria		
Time**	16.2 (2.7)	25.9 (6.8)
Errors	0	0.2 (0.4)
Trail Making Test A & B		
A- Time**	21.9 (7.0)	38.1 (11.2)
A- Errors	0	0
B- Time**	44.3 (12.5)	68.0 (24.7)
B- Errors	0.1 (0.3)	0.1 (0.5)
B minus A	22.4 (11.8)	30.9 (18.7)
Digit Span		
Forward	11.4 (1.7)	10.5 (2.3)
Backward	9.3 (2.3)	7.6 (2.6)
Wisconsin Card Sorting Task		
Categories**	4.7 (0.6)	3.4 (1.4)
Errors**	9.1 (3.9)	17.8 (9.9)

* $p < .05$; ** $p < .01$; M: Mean, SD: Standard Deviation

3.2. Task

The task consists of 36 short stories and probes constructed by Scherer et al. (2007). The stories and probes were divided into three blocks evaluating different components of the discourse comprehension model: microproposition, macroproposition and situation model. Participants had to read a short story (about 3 or 4 sentences) on a computer. Right after that, they had to press a button to indicate whether the presented probe was true or false, according to

the short story they had just read. All the stories and probes had been controlled for the number of sentences, words, syllables, letters and propositions (Scherer et al., 2007). None of the stories and probes contained irony, indirect language or metaphor. Each block lasted 600 seconds (10 minutes), for a total of 30 minutes for the whole task. Each block began after presentation of a fixation cross for 45 seconds. The run then consisted of a short story displayed for 15 seconds; a probe for 5 seconds, when the participants had to answer “true” or “false”; and a fixation cross for 20 seconds. This 40-second run was repeated 12 times during each block. After that, a fixation cross was presented for 35 seconds and the participants could relax for 60 seconds. The order of the blocks was counterbalanced between the participants.

3.3. Questionnaire on reading habits

In order to establish the participants’ reading habits, a questionnaire adapted from Wilson, Barnes, and Bennett (2003) was used. This questionnaire contains items about different aspects of reading (frequency of reading, types of reading, visits to the library, etc.) during five different periods of respondents’ life (at 6, 12, 18 and 40 years old and now) (Wilson et al., 2003). The questionnaire uses a scoring scale between 1 and 5; 1 represents “less than once a year” and 5 represents “almost every day.” The total score for the young adults was 100. The total score for the elderly adults was 125, but a percentage was calculated to compare their data to the data from the young adults. The

difference is due to the fact that the elderly adults gave answers related to when they were 40 years old, but the young adults could not do this.

3.4. Procedure

The task was performed individually in a dark and silent room in the Centre de Recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal (CRIUGM). The participants were seated on a chair in front of a computer and they had an NIRS headpiece placed on their forehead against the prefrontal cortex. The right index finger was on the location of the letter “p” and the left index finger on the location of letter “q” on the keyboard. These keys were covered by a big green “V” (for *vrai* in French, meaning ‘true’) and a big red “F” (for *faux* in French, meaning ‘false’). The locations of the “V” and the “F” were counterbalanced between the participants. They were asked to read silently and to avoid speaking or moving.

3.5. Data acquisition

The data were acquired using a TechEn CW32 NIRS system on the prefrontal cortex (headpiece placed on the participant’s forehead). One source and four detectors were distributed on both left and right hemispheres, for a total of eight source-detector pairs corresponding to eight channels (see Figure 1). The channels covered on Brodmann area (BA) 10 (channels 1, 4, 5 and 6)

and BA 46 (channels 2, 3, 7 and 8). Channels 6, 4, 7 and 2 correspond, respectively, to Fp1, Fp2, AF3 and AF4 according to the 10/20 international system (Jasper, 1958). The near-infrared light consisted of two wavelengths (690 nm and 830 nm) to assess the measures of HbO and HbR. The changes in HbO and HbR concentration were estimated by the general linear model and calculated by the modified Beer-Lambert law.

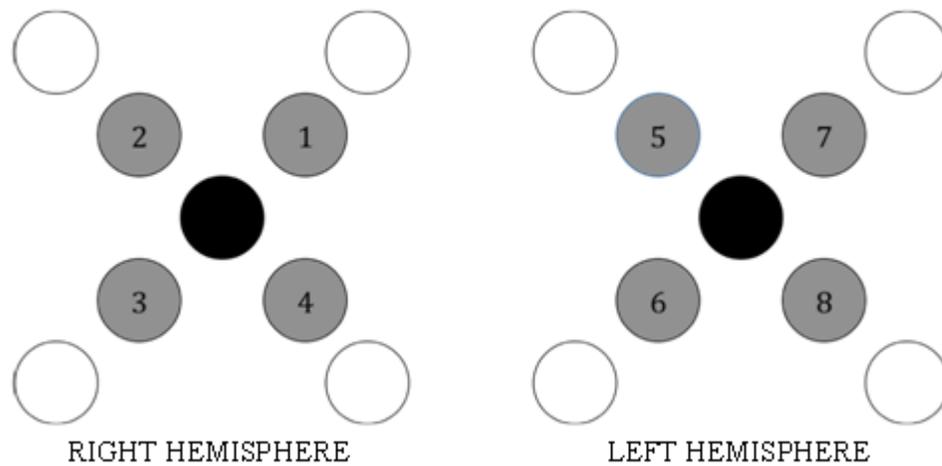


Figure 1. The positioning of the sources (black), detectors (white) and channels (gray).

3.6. Statistical analysis

To investigate the relationship between reading habits and brain function during the processing of the discourse comprehension task, correlation analyses were done (1) between the behavioral data (performance and reaction times in the task) and the scores obtained in the reading habits questionnaire; and (2) between the neuroimaging data (variation in HbO and HbR during the

task) and the scores obtained in the reading habits questionnaire. The correlation analyses were performed separately for each age group. Only the neuroimaging data from trials in which the participant gave the right answer were kept, since the study aimed at analyzing correct responses in discourse comprehension. The correlations using Pearson's coefficient were performed by SPSS software 18.0 (Statistical Package for Social Sciences).

4. Results

In the questionnaire on their reading habits, the mean score for the young participants was 74/100 (SD = 7.4) and the mean for the elderly participants was 69/100 (SD = 8.5) (see Figure 2).

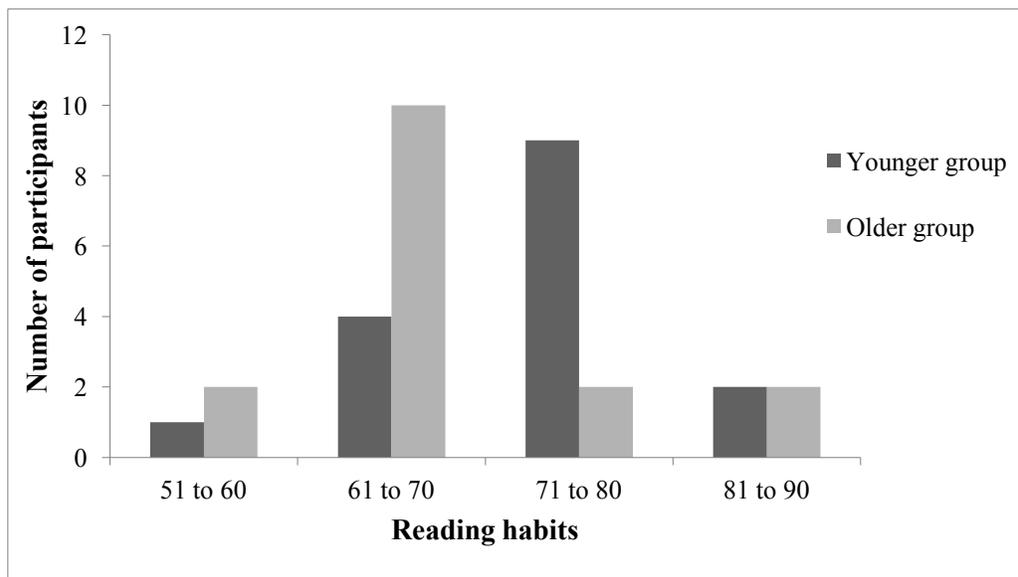


Figure 2. Distribution of the young and elderly participants based on their score out of 100 for the questionnaire on reading habits throughout their lives.

4.1. Behavioral data

This part of the study looks at the possible correlation between reading habits and accuracy of responses (Table II) and between reading habits and reaction times (Table III). The only significant correlation was found between reading habits and accuracy for the situation model in the older group of participants. This correlation shows that participants with the strongest reading habits are the ones who produced the most incorrect answers. There is no significant correlation between reading habits and reaction time. However, there is a tendency in the younger group for participants who read the most to answer faster than the others (Figure 3). This tendency is not present in the older group (Figure 4).

Table II. Pearson's correlation coefficient between the accuracy of responses and scores on the reading habits questionnaire for each condition.

Condition	Younger group	Older group
Micropropositions	0.183	-0.077
Macropropositions	-0.240	0.240
Situation model	0.464	-0.611*

*p < .05

Table III. Pearson's correlation coefficient between reaction times (ms) and scores on the reading habits questionnaire for each condition.

Condition	Younger group	Older group
Micropropositions	-0.480	0.359
Macropropositions	-0.315	0.204
Situation model	-0.348	-0.202

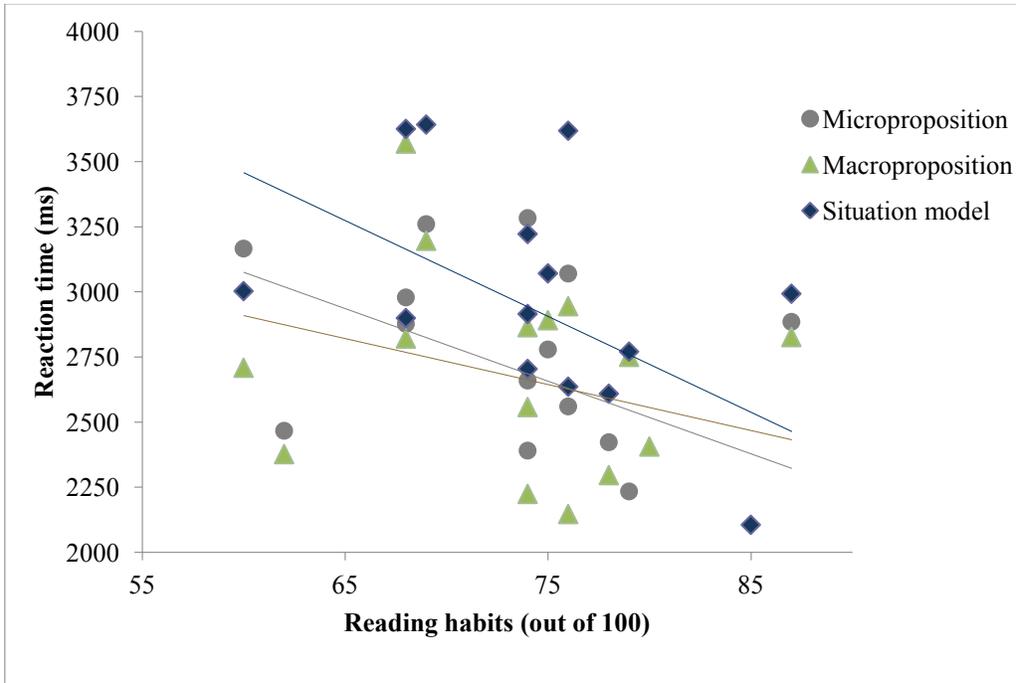


Figure 3. Relationship between scores for reading habits and reaction times in all three conditions for the younger group.

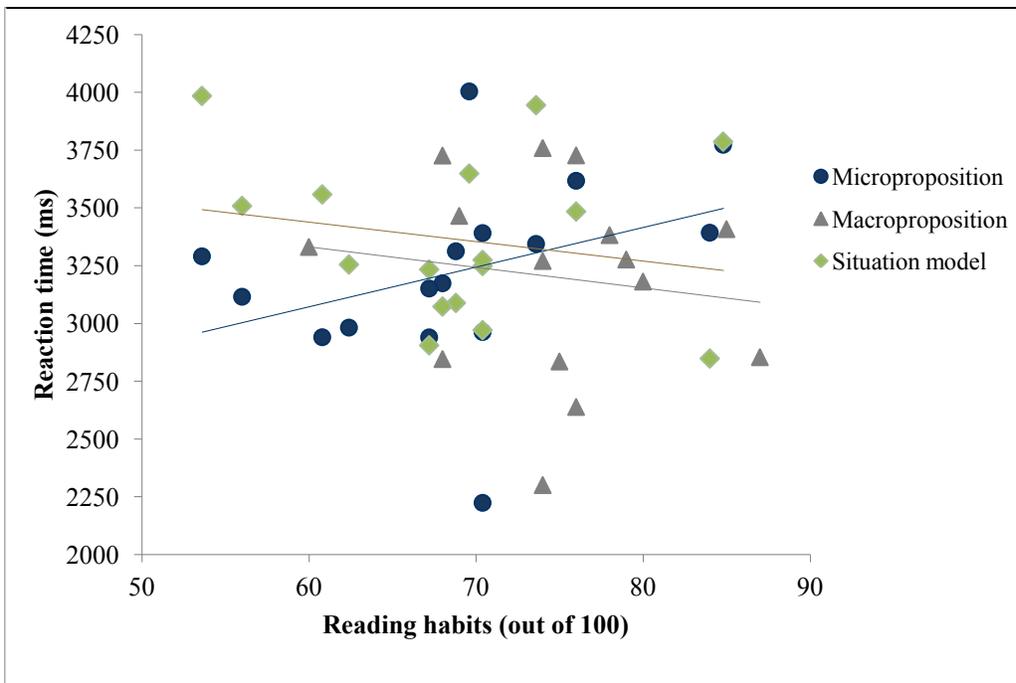


Figure 4. Relationship between scores for reading habits and reaction times in all three conditions for the older group.

4.2. Neuroimaging data

This part of the study looks at the possible correlation between reading habits and brain activity, as shown by the variation of HbO and HbR in the prefrontal cortex. Significant correlations were found between reading habits and HbO variation in channels 5 and 7 (refer to Table IV) for the older group. These correlations were found in all three conditions of the discourse comprehension task. Participants with the strongest reading habits experienced more HbO variation than others while they were reading the story, but less HbO variation while they answered the probes (Figures 5 and 6). There is no clear pattern of correlation for the younger group; in fact, there is only one significant correlation, between reading habits and brain activity in channel 5 (Table V).

Table IV. Pearson's correlation coefficient between the variation in HbO concentration and scores on the reading habits questionnaire for each channel in each condition in the older group.

Channels	Micropropositions		Macropropositions		Situation model	
	Story	Probe	Story	Probe	Story	Probe
1	0.112	0.037	0.372	0.099	-0.048	-0.373
2	-0.102	-0.584*	0.157	0.227	0.177	-0.342
3	-0.187	0.020	-0.115	-0.070	0.003	-0.266
4	-0.064	-0.065	0.014	-0.262	0.124	-0.479
5	0.152	-0.720**	0.564*	-0.569*	0.522*	-0.676**
6	-0.308	0.080	-0.269	-0.151	0.210	-0.330
7	0.220	-0.572*	0.517*	-0.498*	0.554*	-0.676**
8	-0.068	-0.184	-0.060	-0.195	0.166	-0.476

*p < .05; ** p < .01

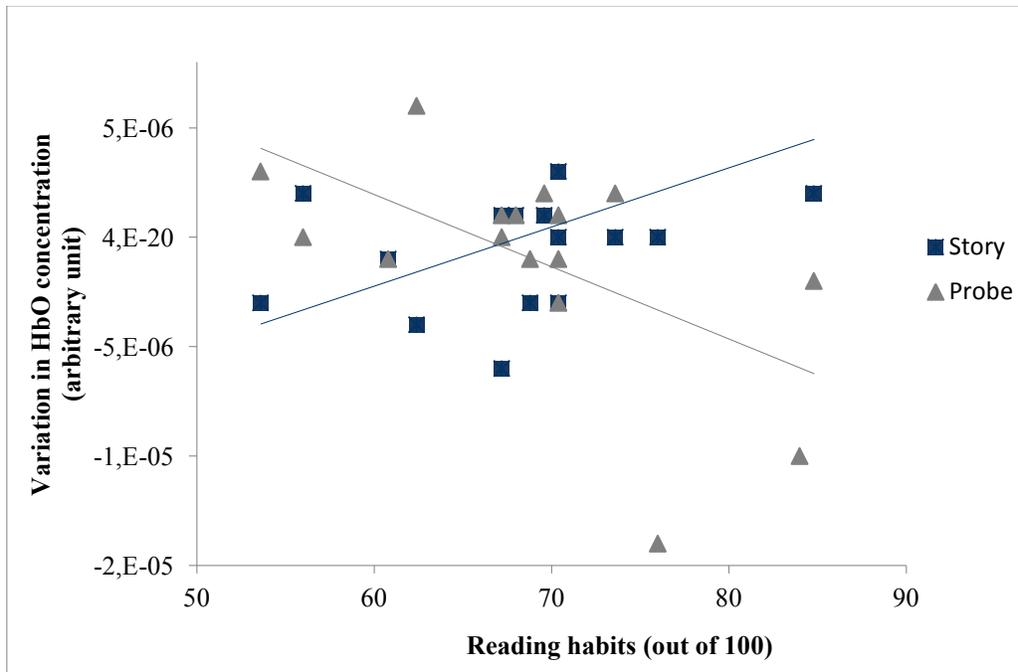


Figure 5. Relationship between the variation in HbO concentration in channel 5 and reading habits for the older group in the macroproposition condition while participants read the story (0.564*) and answered the probe (-0.569*).

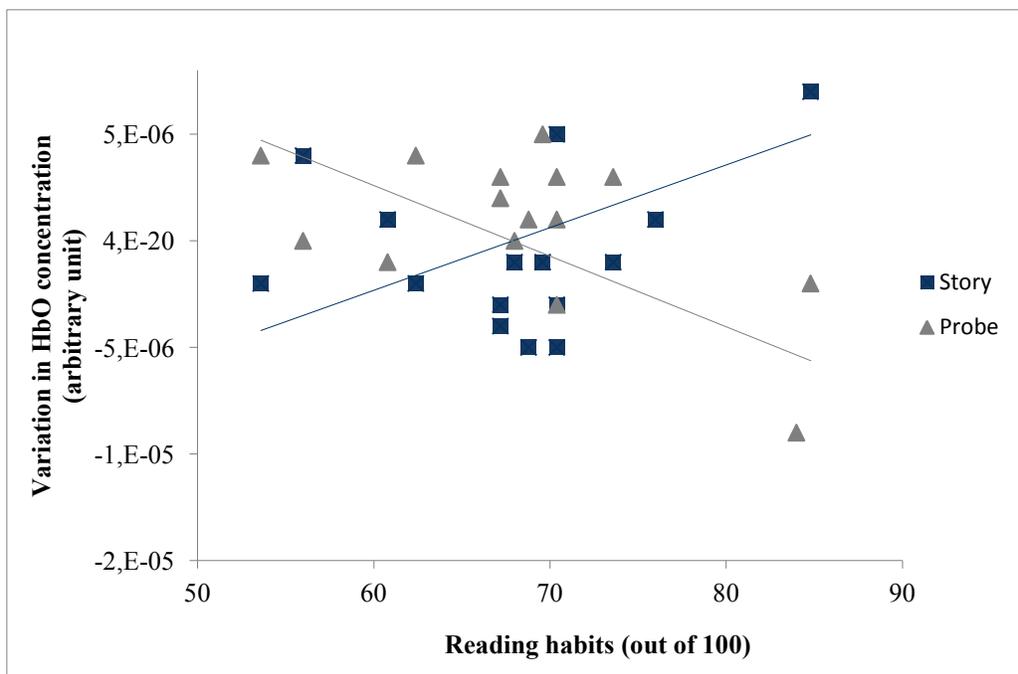


Figure 6. Relation between the variation in HbO concentration in channel 7 and reading habits for the older group in the macroproposition condition while the participants read the story (0.517*) and answered the probe (-0.498*).

Table V. Pearson's correlation coefficient between the variation in HbO concentration and scores on the reading habits questionnaire for each channel in each condition in the younger group.

Channels	Micropropositions		Macropropositions		Situation model	
	Story	Probe	Story	Probe	Story	Probe
1	-0.105	-0.232	-0.193	-0.325	-0.418	-0.193
2	-0.029	-0.196	-0.077	-0.341	-0.388	-0.138
3	-0.065	0.325	-0.450	-0.192	-0.479	-0.040
4	-0.078	0.095	-0.320	0.047	-0.335	0.213
5	-0.254	0.059	-0.150	-0.276	-0.505*	-0.076
6	-0.143	0.184	-0.256	-0.047	-0.226	0.030
7	-0.069	0.193	-0.124	-0.190	-0.382	-0.028
8	0.007	0.441	-0.339	0.041	-0.270	-0.035

*p < .05

Few significant correlations appeared between reading habits and HbR variation in the older group (Table VI). There was no clear pattern for the variation in HbR. In the younger group, there was no significant correlation between reading habits and HbR variation (Table VII).

Table VI. Pearson's correlation coefficient between the variation in HbR concentration and scores on the reading habits questionnaire for each channel in each condition in the elderly group.

Channels	Micropropositions		Macropropositions		Situation model	
	Story	Probe	Story	Probe	Story	Probe
1	0.145	0.482	0.434	0.547*	0.063	0.270
2	0.629**	-0.420	0.612*	0.591*	0.036	-0.079
3	0.175	0.685**	-0.155	0.382	0.012	-0.030
4	0.452	-0.164	0.200	-0.193	0.012	-0.048
5	-0.138	-0.003	0.339	-0.075	0.519*	-0.462
6	0.139	0.194	0.117	0.115	0.029	0.400
7	0.479	-0.384	0.467	-0.183	0.548*	-0.535*
8	0.264	0.157	-0.079	0.208	-0.016	0.441

*p < .05; ** p < .01

Table VII. Pearson’s correlation coefficient between the variation in HbR concentration and scores on the reading habits questionnaire for each channel in each condition in the younger group.

Channels	Micropropositions		Macropropositions		Situation model	
	Story	Probe	Story	Probe	Story	Probe
1	0.305	0.030	0.097	0.082	-0.010	-0.318
2	-0.021	0.301	-0.269	0.169	-0.126	-0.027
3	-0.110	0.114	-0.196	-0.020	-0.328	-0.063
4	-0.023	0.298	-0.239	0.380	-0.219	0.266
5	0.074	-0.081	-0.150	-0.031	-0.049	-0.224
6	-0.137	0.139	0.021	0.045	0.071	-0.073
7	0.017	0.278	-0.382	0.221	0.231	0.038
8	-0.074	0.010	-0.315	0.207	0.240	0.018

5. Discussion

5.1. Behavioral data

As predicted, reading habits seemed to have no correlation on the accuracy of answers in the microproposition and macroproposition conditions. This could be explained by the fact that those two levels of comprehension depend heavily on the working memory capacities, thus, they may be less influenced by reading frequency (Kintsch, 1988).

The prediction was different for the situation model. Because it corresponds to a superior level of comprehension, it seemed logical to presume that reading habits could influence it. In fact, the results show that there was a trend toward a positive correlation, but not a significant one, between reading habits and accuracy of answers in the younger group. Thus, participants with

stronger reading habits produced more accurate answers. This supports the hypothesis, but the lack of significance does not allow making any further claims.

In the older group, there was a significant negative correlation between reading habits and accuracy of answers in the situation model condition. Elderly participants who obtained the highest scores for reading habits had the most difficulty in that condition of the task. One explanation could be that people with better reading skills read faster and tend to skip some details of the text, leading them to miss some essential components for the comprehension of the situation model. However, the same phenomenon should have been seen in the microproposition and macroproposition conditions. Another possibility is that there may have been a methodological problem. Because there was a time limit of 5000 ms to answer each probe, some of the participants were not able to answer all of them especially in that condition which may lead to biased analysis.

In the younger group, the correlation between reading habits and reaction times shows that the participants with better reading habits tended to answer faster (Figure 3). However, this correlation was not significant. In the elderly group, there was no significant correlation, or tendency, between reading habits and reaction times (Figure 4). This difference between the two age groups may be explained by the decline in processing speed in aging

(Salthouse, 1996). This finding could suggest that better reading habits do not compensate for the decrease in processing speed with increased age. Further studies are needed to investigate the specific interaction between reading habits throughout life and the age-related decrease in processing speed.

5.2. Neuroimaging data

The hypothesis was that cerebral activity should be reduced in participants with stronger reading habits because the task should be easier for them. For the younger group, there was only one significant correlation between activity in the prefrontal cortex (HbO) and reading habits: in channel 5 for the situation model during the story reading. There was no significant correlation between activity in the prefrontal cortex and reading habits when we examined the variation in HbR concentration. Consequently, it is impossible to determine an effect of reading habits or observe a clear pattern in the younger group. Those results are not surprising if reading habits are considered as contributing to cognitive reserve (Stern, 2009). In that case, reading habits would help to slow or compensate for the cognitive decline linked to aging. Because this group was too young to show this kind of cognitive decline, their reading habits could not yet have a noticeable impact on cerebral activity.

The results were more interesting for the older group. In fact, all the significant correlations between the variation in HbO concentration and reading

habits, except one, were in channels 5 and 7. Correlations can be observed for the microproposition probes and for story reading and the macroproposition and situation model probes. Those two channels are located next to each other in the left dorsolateral prefrontal area of the brain. So there is a relation between activity in those brain areas and reading habits. The fact that those correlations are found only in the left hemisphere is probably due to this hemisphere's dominance for language functions. Although discourse comprehension involves bilateral network, it is also known to be a little bit more left-lateralized especially when pragmatic processes are not necessary (Perfetti and Frishkoff, 2008, Moss and Schunn, 2015). The variation in the HbO concentration was not the same during story reading and while answering the probes. In fact, when reading habits are strong, the brain activity measure in channels 5 and 7 is high for story reading and low for probe answering. Thus, it seems that the more experienced readers made a greater effort in processing the story, maybe to make sure they got the maximum information from it. After that, they needed less of an effort to retrieve the information and answer the probes than those who had less reading experience.

A possible explanation of these observations in the more frequent elderly readers is that cognitive decline, especially less efficient short-term and working memory (Verhaeghen et al, 1993, Park et al., 1996), leads the aging brain to make a greater effort to successfully maintain all the information needed. The participants who read less had not trained their brains for this kind

of task, so their brains may not have been ready for the additional effort required to get and maintain all of the necessary information, which explains why they needed to make a greater effort to retrieve information and answer the probe questions. This explanation is also compatible with the absence of differences in the younger group, given that there was no need for compensation in that group.

These findings are in accordance with the cognitive reserve theory (Stern, 2009). From that point of view, frequent reading habits help to increase a participant's cognitive reserves. They are also in accordance with the neurocognitive scaffolding theory (Park and Reuter-Lorenz, 2009). According to this theory, the networks which are the more often used are the ones benefitting from a better protection. Thus, networks associated with reading and comprehension would be better preserved and protected among participants with more frequent reading habits. In the present case, they would be the one benefitting from extra scaffolding explaining the greater activation in the left dorsolateral prefrontal region.

A study by Fincham and Anderson (2006) carefully examined the role of the left dorsolateral prefrontal cortex, especially Brodmann's area 9/46, which corresponds to channel 7 in the present study. According to those authors, this area of the left hemisphere reflects memory retrieval demand. Their study shows a decrease in activity in the left dorsolateral prefrontal cortex

region after training in a memory task. They attributed this decrease to the increased efficiency of the retrieval process. Another study observed a decrease in activity in the dorsolateral prefrontal cortex, in both hemispheres, after a period of training in a spatial stimulus-response task (Jacoboni, Woods, & Mazziotta, 1996).

The present study shows a similar decrease in activation in the left dorsolateral prefrontal cortex region when the more experienced readers were answering the probes. This probably occurred mainly because of their increased efficiency at retrieving the required information. Unlike the study by Fincham and Anderson (2006), our participants had not practiced the task, but they had stronger reading habits. Thus, the participants had more experience in the same domain as the task, even though they had not received conscious training in it. This hypothesis shows the potential importance of life habits for brain plasticity.

While the results concerning HbO concentration show the correlations with reading habits circumscribed in only one area in the prefrontal cortex of the left hemisphere, the results concerning HbR concentration show no clear effects of reading habits on a particular area of the prefrontal cortex. In fact, a few significant Pearson's correlation coefficients between the variation in HbR concentration and reading habits were found, but they did not reflect a clear pattern, as was the case for HbO. This is not particularly surprising since HbO

concentrations are known to be more reliable and sturdy than HbR concentrations to estimate brain activity because HbR concentrations tend to vary less during hemodynamic responses (Wilcox et al., 2009).

6. Conclusion

This study investigated the interaction between reading habits and brain activity in a discourse comprehension task. The results provide some clues for formulating hypotheses about the effect of reading habits on the plasticity of the aging brain. The study shows the importance of the left dorsolateral prefrontal cortex in information retrieval. Further investigations are needed to reproduce and corroborate the results and clarify hypotheses. Reading habits may have an effect on global cognitive reserve or maybe only on the cognitive aspects linked to language function. Future studies should include life habits questionnaires to isolate the potential influence of reading habits on cognitive reserve.

References

- BUSCHKE, H. (1973). Selective reminding for analysis of memory and learning. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *12*, 543-550.
- CABEZA, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in older adults: The HAROLD model. *Psychology and Aging*, *17*, 85–100.
- CAO, Y., VIKINGSTAD, E. M., GEORGE, K. P., JOHNSON, A. F., & WELCH, K. M. (1999). Cortical language activation in stroke patients recovering from aphasia with functional MRI. *Stroke*, *30*, 2331–2340.
- CHESNEAU, S. (2007). *Effets du vieillissement et d'une lésion cérébrale gauche sur la compréhension de textes*. Ph.D. dissertation, Département de sciences biomédicales, Faculté de médecine, Université de Montréal.
- CHESNEAU, S., JBABDI, S., CHAMPAGNE-LAVAU, M., GIROUX, F., & SKA, B. (2007). [Text comprehension, cognitive resources and aging]. *Psychologie et Neuropsychiatrie du Vieillessement*, *5*, 47–64.
- CRAIK, F. I. M., & SALTHOUSE, T. A. (2000). *The handbook of aging and cognition*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- 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*, 1201–1209.
- ERICSSON, K. A., & KINTSCH, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*, *102*, 211–245.
- ESTEVE, M. E., & GIL, A. C. (2012). [Reading as a protective factor against cognitive decline.]. *Gaceta Sanitaria* [e-publication].
- FINCHAM, J. M., & ANDERSON, J. R. (2006). Distinct roles of the anterior cingulate and prefrontal cortex in the acquisition and performance of a cognitive skill. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *103*, 12941–12946.
- FOLSTEIN, M. F., FOLSTEIN, S. E., & MCHUGH, P. R. (1975). Mini Mental State. *Journal of Psychiatric Research*, *12*, 189–198.

- GRATTON, G., & FABIANI, M. (2007). Optical imaging of brain function. In R. Parasuraman & M. Rizzo (Eds.), *Neuroergonomics: The brain at work* (pp. 65–81). Oxford, UK: Oxford University Press.
- HOSHI, Y. (2007). Functional near-infrared spectroscopy: Current status and future prospects. *Journal of Biomedical Optics*, *12*, 062106.
- IACOBONI, M., WOODS, R. P., & MAZZIOTTA, J. C. (1996). Brain-behavior relationships: Evidence from practice effects in spatial stimulus-response compatibility. *Journal of Neurophysiology*, *76*, 321–331.
- JASPER, H. (1958). Progress and problems in brain research. *Journal of the Mount Sinai Hospital, New York*, *25*, 244–253.
- JONES, R. N., FONG, T. G., METZGER, E., TULEBAEV, S., YANG, F. M., ALSOP, D. C., et al. (2010). Aging, brain disease, and reserve: Implications for delirium. *American Journal of Geriatric Psychiatry*, *18*, 117–127.
- KELLY, A. M., & GARAVAN, H. (2005). Human functional neuroimaging of brain changes associated with practice. *Cerebral Cortex*, *15*, 1089–1102.
- KINTSCH, W. (1988). The role of knowledge in discourse comprehension: A construction-integration model. *Psychological Review*, *95*, 163–182.
- KINTSCH, W., & VAN DIJK, T. A. (1978). Toward a model of text comprehension and production. *Psychological Review*, *85*, 363–394.
- LEMAIRE, P., & BHERER, L. (2005). *Psychologie du vieillissement. Une perspective cognitive*. Brussels: de Boeck.
- MOSS, J. & SCHUNN, C. D. (2015). Comprehension through explanation as the interaction of the brain's coherence and cognitive control networks. *Front Hum Neurosci*, *9*, 562.
- NELSON, H. E. (1976). A modified card sorting test sensitive to frontal lobe defects. *Cortex*, *12*(4), 313–324.
- OLDFIELD, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, *9*, 97–113.

- PARENTE, M. A. M. P., FONSECA, R. P., & SCHERER, L. C. (2008). Literacy as a determining factor for brain organization: From Lecours' contribution to the present day. *Dementia e Neuropsychologia*, 2, 165–172.
- PARK, D. C., & REUTER-LORENZ, P. (2009). The adaptive brain: Aging and neurocognitive scaffolding. *Annual Review of Psychology*, 60, 173–196.
- PARK, D. C., SMITH, A. D., LAUTENSCHLAGER, G., EARLES, J. L., FRIESKE, D., ZWAHR, M. & GAINES, C. L. (1996). Mediators of long-term memory performance across the life span. *Psychol Aging*, 11, 621-37.
- PERFETTI, C. A. & FRISHKOFF, G. A. (2008). The Neural Bases of Text and Discourse Processing. In: STEMMER, B. & WHITAKER, H. A. (eds.) *Handbook of the Neuroscience of Language*. London: Academic Press.
- RADVANSKY, G. A. (1999). Memory retrieval and suppression: The inhibition of situation models. *Journal of Experimental Psychology: General*, 128, 563–579.
- RADVANSKY, G. A., & DIJKSTRA, K. (2007). Aging and situation model processing. *Psychonomic Bulletin and Review*, 14, 1027–1042.
- RADVANSKY, G. A., ZWAAN, R. A., CURIEL, J. M., & COPELAND, D. E. (2001). Situation models and aging. *Psychology and Aging*, 16, 145–160.
- REITAN, R. M., & WOLFSON, D. (1985). *The Halstead-Reitan Neuropsychological Test Battery*. Tucson: Neuropsychology Press.
- SALTHOUSE, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review*, 103, 403–428.
- SCHAIK, K. W. (2008). Historical processes and patterns of cognitive aging. In S. M. Hofer & D. F. Alwin (Eds.), *Handbook on cognitive aging* (pp. 368–383). Thousand Oaks, CA: Sage.
- SCHERER, L. C., SKA, B., GIROUX, F., LESAGE, F., SENHADJI, N., MARCOTTE, K., et al. (2007). Discourse comprehension in successful aging: A NIRS study. *Brain and Language*, 103, 228–229.

- SOLE-PADULLES, C., BARTRES-FAZ, D., JUNQUE, C., VENDRELL, P., RAMI, L., CLEMENTE, I. C., et al. (2009). Brain structure and function related to cognitive reserve variables in normal aging, mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Neurobiology of Aging*, 30, 1114–1124.
- STERN, Y. (2002). What is cognitive reserve? Theory and research application of the reserve concept. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 8, 448–460.
- STERN, Y. (2009). Cognitive reserve. *Neuropsychologia*, 47, 2015–2028.
- STRANGMAN, G., BOAS, D. A., & SUTTON, G. P. (2002). Non-invasive neuroimaging using near-infrared light. *Biological Psychiatry*, 52, 679–693.
- STROOP, J. R. (1935). Studies of interference on serial verbal reaction. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- VAN DIJK, T. A., & KINTSCH, W. (1983). *Strategies of discourse comprehension*. New York: Academic Press.
- VERHAEGHEN, P., MARCOEN, A. & GOOSSENS, L. (1993). Facts and fiction about memory aging: a quantitative integration of research findings. *J Gerontol*, 48, P157-71.
- WECKSLER, D. (1991). *Échelle clinique de Mémoire de Wecksler-Révisée*. Montréal: Centre de Psychologie appliquée.
- WILCOX, T., BORTFELD, H., WOODS, R., WRUCK, E., ARMSTRONG, J. & BOAS, D. (2009). Hemodynamic changes in the infant cortex during the processing of featural and spatiotemporal information. *Neuropsychologia*, 47, 657-62.
- WILSON, R., BARNES, L., & BENNETT, D. (2003). Assessment of lifetime participation in cognitively stimulating activities. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 25, 634–642.
- WOLINSKY, F. D., MAHNCKE, H., VANDER WEG, M. W., MARTIN, R., UNVERZAGT, F. W., BALL, K. K., et al. (2010). Speed of processing training protects self-rated health in older adults: Enduring effects

observed in the multi-site ACTIVE randomized controlled trial.
International Psychogeriatrics, 22, 470–478.

Chapitre 3 : Discussion générale

Les trois études présentées précédemment permettent de répondre aux objectifs visés par cette thèse, soit évaluer l'influence du vieillissement normal et du niveau d'éducation sur les capacités de compréhension du discours écrit et sur l'activité cérébrale s'y rattachant ainsi que d'estimer si les habitudes de lecture pouvaient avoir un effet modulateur sur ces aspects.

Afin de répondre à ces objectifs une tâche de lecture fut utilisée sous imagerie optique. Dans cette dernière, les participants devaient lire de courts textes narratifs, puis répondre par vrai ou faux à une affirmation concernant le dernier texte lu. Les affirmations permettaient d'évaluer les niveaux suivant du discours : microstructure, macrostructure et modèle de situation. Le casque d'imagerie optique utilisé a permis d'estimer la réponse hémodynamique provoquée par la tâche dans les régions préfrontales, frontales et temporales du cortex. Un groupe de participants âgés ayant un niveau universitaire de scolarité a d'abord été comparé à un groupe jeune ayant le même niveau de scolarité, puis à un groupe de participants âgés ayant un niveau secondaire de scolarité.

1. Retour sur les principaux résultats des différentes études

1.1. Résultats comportementaux

Pour la partie comportementale de l'étude, les hypothèses principales étaient que a) les participants plus âgés obtiendraient de moins bons résultats

que les plus jeunes au niveau des micropropositions, mais des résultats comparables au niveau des macropropositions et du modèle de situation et que b) les participants ayant un plus haut niveau de scolarité devraient avoir de meilleurs résultats à la tâche, plus particulièrement au niveau des affirmations concernant le modèle de situation.

Les résultats indiquent que le groupe âgé a significativement moins bien réussi que le groupe jeune au niveau des questions portant sur la microstructure et sur le modèle de situation, mais de façon comparable au niveau des questions sur la macrostructure. De plus, contre toute attente, le groupe ayant un niveau universitaire de scolarité et celui ayant un niveau secondaire ont obtenu des résultats semblables pour les trois niveaux de compréhension.

Les résultats concernant la microstructure et la macrostructure étaient attendus. La tâche utilisée avait été bâtie avec de courts textes et de courts laps de temps entre les textes et les questions afin de minimiser l'influence de la mémoire de travail et ainsi d'évaluer davantage les capacités de compréhension et de rappel de la microstructure. Malgré cela, les participants âgés ont tout de même eu plus de difficulté à rappeler la microstructure, démontrant que cette composante de la compréhension serait bel et bien influencée par le vieillissement. Ces résultats sont en accord avec l'idée rapportée par d'autres auteurs que les participants âgés s'appuieraient davantage sur le propos

(contenu sémantique) du texte que sur le texte lui-même (mots et phrases) pour bien le comprendre (Radvansky et al., 2001, Radvansky et Dijkstra, 2007).

Deux hypothèses peuvent être formulées à partir de cette dernière observation. Premièrement, les personnes âgées rappelleraient peut-être moins bien la microstructure, car ils liraient de façon plus efficace en mettant plus rapidement de côté les informations inutiles à l'extraction de l'essentiel du texte. Cette façon de procéder permettrait d'entretenir de plus courts réseaux propositionnels plus légers à traiter lors des différents cycles de compréhension. La compréhension globale demeurerait donc bien présente avec le vieillissement, mais la capacité à rappeler les détails s'en trouverait diminuée.

Deuxièmement, à l'inverse, il est possible que ce soit les participants plus jeunes qui s'appuient trop sur la microstructure lors de la compréhension. Ces derniers n'ayant quitté l'école que récemment au moment de l'étude, auraient tendance à lire en tentant de retenir le plus d'informations possible, c'est-à-dire de la même façon que lors de la préparation à un examen. Cette manière de procéder devrait logiquement disparaître graduellement après la fin des études d'un individu, car elle est inutilement épuisante d'un point de vue cérébral puisque retenir toute l'information présentée contribue finalement peu à la compréhension globale du texte.

De leur côté, les résultats concernant le modèle de situation étaient un peu plus surprenants. Les plus faibles résultats des personnes âgées à ce niveau, à l'encontre de la littérature, s'expliquent possiblement par le fait que la présente étude a visé les aspects d'intégration et d'inférence du modèle pour ce bloc de textes, laissant l'opération de cerner l'essentiel du texte au bloc traitant de la macrostructure. Bien que des questions nécessitant de produire une inférence soient plus difficiles à répondre que des questions informelles, le déclin lié à l'âge devrait être le même pour ces deux types de questions (Sommers et al., 2011).

Pourtant, il a déjà été rapporté que les personnes âgées s'appuient davantage sur leurs connaissances antérieures lors de la compréhension. Donc, ils n'auraient pas dû avoir de problèmes avec les inférences (Maury et al., 2010). En fait, le grand apport des connaissances antérieures des personnes âgées dans la construction du modèle de situation aurait dû entraîner un plus grand nombre d'inférences et possiblement un modèle de situation plus riche. Une explication possible de ces plus faibles performances se trouve donc dans la conception de la tâche utilisée. En effet, la construction du modèle de situation est peut-être affectée par la brièveté des textes. Ces courts textes ne donneraient pas assez d'informations, de redondance et de temps pour bien consolider le modèle de situation, rendant la connexion avec les connaissances antérieures potentiellement plus difficile à initier. De plus, le type de connaissances nécessaires à la compréhension complète des textes était des

connaissances de la vie de tous les jours. Ainsi, jeunes comme âgés étaient des spécialistes de ce type de savoir réduisant ainsi possiblement l'avantage habituel des personnes âgées.

De prime abord, la complète absence de différence entre les deux groupes âgés n'ayant pas le même niveau de scolarité était également surprenante. Par contre, ces résultats s'expliquent lorsque l'on prend en considération que ces deux groupes avaient un niveau d'activités cognitives stimulantes similaires et surtout des habitudes de lecture semblables depuis près de 30 ans. De plus, ces groupes avaient également eu des scores élevés au test de vocabulaire Mill Hill, ce qui est probablement le résultat d'un niveau de lecture de qualité au cours de leur vie. Il semble donc que le maintien lors du vieillissement d'un bon niveau d'activité stimulant la cognition, dont des habitudes de lecture assidues, ait ici primé sur l'influence de l'éducation sur les capacités de compréhension du discours. Des résultats similaires ont été observés dans une tâche de mémoire épisodique où les participants moins scolarisés qui s'adonnaient à des activités stimulant la cognition au moins une fois par semaine obtenaient des scores comparables à la tâche que les participants ayant un plus haut niveau de scolarité (Lachman et al., 2010).

Pour l'évaluation des capacités de compréhension du discours, la principale limite de l'étude était le nombre d'affirmations limité à douze par niveau de compréhension, à cause des contraintes de la NIRS. Un plus grand

nombre d'affirmations aurait possiblement permis d'accentuer la différence entre les capacités de rappel de la macrostructure et des autres niveaux de compréhension et de mieux cerner les résultats inattendus concernant le modèle de situation en augmentant la puissance statistique.

1.2. Résultats de neuroimagerie

Pour la partie neuroimagerie de l'étude, les hypothèses principales étaient que a) les participants âgés auraient une plus grande activité cérébrale que les plus jeunes, plus particulièrement dans les régions du cortex préfrontal et que b) les participants plus scolarisés, ayant théoriquement une plus grande réserve cognitive, devraient démontrer plus de plasticité cérébrale.

D'abord, dans les trois groupes, des réponses hémodynamiques furent observées dans les principales régions liées à la compréhension et à la lecture, notamment : le gyrus temporal moyen gauche associé à l'intégration et interprétation des textes (Ferstl et al., 2008), le cortex préfrontal lié à l'intégration des connaissances et la capacité de relier les différentes parties du texte déjà lu (Perfetti et Frishkoff, 2008, Schmalhofer et Perfetti, 2007), le cortex pré-moteur et l'aire motrice supplémentaire rattachés à la lecture, même silencieuse, de mots d'action (Hauk et Pulvermuller, 2004) et le gyrus fusiforme gauche impliqué dans la reconnaissance visuelle des mots et donc à la lecture (McCandliss et al., 2003, Dehaene et Cohen, 2011).

Lors du moment accordé à la réponse, les trois groupes ont démontré principalement des réponses hémodynamiques dans le cortex préfrontal, principalement dans la région dorsolatérale, pouvant être liées aux besoins de la récupération mnésique nécessaire pour la réponse (Fincham et Anderson, 2006) et dans le cortex pré-moteur et l'aire motrice supplémentaire possiblement lié à l'anticipation et à la préparation du mouvement nécessaire pour répondre (Kilavik et al., 2014). Les réponses hémodynamiques observées dans le cortex préfrontal étaient plus courtes chez les plus jeunes probablement en lien avec leurs temps de réponse plus courts.

Cependant, une seule différence significative émerge des analyses comparatives entre les participants jeunes et âgés. En effet, les participants âgés démontraient une plus grande variation de la concentration d'HbO lors de la lecture des textes dans les régions d'intérêt 1L et 2L correspondant principalement au cortex dorsolatéral préfrontal gauche. Ces réponses hémodynamiques plus grandes et plus soutenues pourraient être le signe que les personnes âgées ont besoin de recruter plus de ressources attentionnelles lors de la lecture. Il pourrait également s'agir d'une stratégie compensatrice visant à maximiser l'encodage et l'intégration des informations lues. Malgré des différences tant au niveau de l'exactitude des réponses données que du temps de réponse, les groupes jeunes et âgés ne démontrent aucune différence significative du point de vue de l'activité cérébrale lorsqu'ils répondaient aux affirmations.

Tout comme pour les données comportementales, aucune différence significative ne ressort des analyses comparatives des réponses hémodynamiques des deux groupes âgés n'ayant pas le même niveau de scolarité et ce tant pour la lecture que pour le moment de réponse aux affirmations. Puisque les deux groupes étaient finalement similaires sur tous les aspects à l'exception du niveau d'éducation, il n'est pas si étonnant que leurs performances et leur activité cérébrale soient comparables. Cela voudrait dire que l'éducation, lorsque isolé en tant que facteur, n'est peut-être pas le meilleur déterminant de la plasticité cérébrale, du moins dans une tâche de compréhension.

Il faut aussi noter, et cela constitue une des limites de ces études, que la variabilité du profil de réponses hémodynamiques entre les participants, surtout dans le groupe plus jeune, était très grande. Des groupes plus importants ou une meilleure qualité du signal capté auraient peut-être permis de mieux cerner les différences entre ces groupes, plus particulièrement entre le groupe jeune et le groupe âgé. La variabilité intra-groupe était plus importante dans les données concernant la lecture des textes que celles concernant les réponses. Il est possible de penser que des temps de lecture différents d'un sujet à l'autre expliqueraient en partie la grande variabilité observée.

Dans les trois groupes, aucune différence intra-groupe n'a été observée entre les trois niveaux de compréhension du point de vue de l'activité cérébrale

tant au moment de la lecture qu'au moment de répondre aux affirmations. Ces résultats étaient attendus puisque les processus impliqués dans les différents niveaux de compréhension sont interdépendants et simultanés lors de la lecture et que la partie réponse à une affirmation correspond davantage à une tâche de récupération de l'information traitée et assimilée lors de la lecture. Cette absence de différences intra-groupe pour les trois conditions du point de vue de l'activité cérébrale est une donnée intéressante pour la construction de futures tâches de compréhension destinées à la neuroimagerie. Ces résultats pourraient, entre autres, permettre de regrouper les données obtenues des trois conditions de compréhension au moment de la lecture.

1.3. Pistes de réflexion sur l'influence des habitudes de lecture

La troisième étude présentée visait à évaluer l'interaction possible entre les habitudes de lecture et l'activité cérébrale. L'hypothèse principale était que le niveau d'activité cérébrale des personnes ayant des habitudes de lecture fréquentes devrait être moins grand, car ils sont en quelques sortes entraînés pour le type de tâche utilisé. Les résultats obtenus n'ont cependant pas pu être reproduits avec les données collectées dans les deux premières études.

Des corrélations ont été observées entre la variation de concentration d'HbO lors de la tâche dans les deux canaux couvrant le cortex dorsolatéral préfrontal gauche et les habitudes de lecture des participants âgés. L'activité

cérébrale serait plus grande lors de la lecture, mais plus petite lors du moment de la réponse chez les plus grands lecteurs. Cela démontre que les grands lecteurs mettraient plus d'effort dans le traitement et la compréhension des textes, mais qu'ils auraient besoin de moins de ressources pour récupérer les informations nécessaires afin de répondre aux affirmations.

L'hypothèse découlant de ces observations est que les grands lecteurs seraient mieux entraînés et ainsi plus conscients de l'effort nécessaire afin d'encoder et d'organiser l'information lors de la lecture malgré le déclin cognitif accompagnant le vieillissement. Les lecteurs occasionnels ne mettraient pas suffisamment d'effort lors de la lecture pour bien encoder l'information. Ayant mal compensé le déclin cognitif lié au vieillissement, ils devront mettre plus d'efforts au moment de sa récupération. Une étude avait déjà montré une diminution de l'activité cérébrale dans le cortex dorsolatéral gauche suite à un entraînement dans une tâche de récupération mnésique (Fincham et Anderson, 2006). Ici, cette diminution de l'activité cérébrale lors de récupération d'information est aussi présente. Cependant, l'entraînement pour ce type de tâches n'a pas été fait en laboratoire, mais est le résultat des habitudes de lecture fréquentes maintenues par certains participants dans leur quotidien. Il est également intéressant de noter que la région impliquée est la même que celle décrite dans la comparaison entre les plus jeunes et les plus âgés. Cela accentue donc le rôle potentiel de modulateur de la compréhension du discours que pourrait jouer le cortex dorsolatéral préfrontal gauche.

Bien que cette étude amène des pistes de réflexions intéressantes sur l'interaction entre les habitudes cognitives des gens et l'activité cérébrale, ces résultats ne permettent pas de statuer définitivement sur la nature de cette relation. D'abord, les corrélations décrites dans cet article sont relativement faibles avec des coefficients de Pearson entre 0,5 et 0,7. Un échantillon restreint, comme celui-ci, est trop influencé par quelques participants, surtout ceux se trouvant aux extrêmes de l'étendue des données. Une étude corrélationnelle plus fiable et solide aurait nécessité beaucoup plus de participants afin d'avoir plusieurs représentants dans chacun des niveaux d'habitudes de lecture possibles. Finalement, les résultats de cette étude doivent être considérés avec précaution puisqu'ils n'ont pas pu être répliqués avec les données collectées lors des autres études de cette thèse.

Alors que le fait que la majorité des participants avaient des habitudes de lecture comparables s'est avéré un avantage permettant d'isoler le facteur du niveau de scolarité dans la seconde étude, cela s'est avéré un inconvénient lors de la réplification des résultats obtenus dans la troisième étude présentée dans cette thèse. L'absence de variabilité des habitudes de lecture parmi les participants recrutés a occasionné la formation d'un groupe plus homogène sur cet aspect rendant les analyses corrélationnelles non concluantes. De plus, très peu de participants avaient de faibles habitudes de lecture dans cette cohorte créant une sous représentation de ce profil pourtant fréquent dans la société. Cependant, les participants de recherche préférant souvent prendre part aux

études portant sur des sujets qui les touchent, il n'est pas surprenant d'observer qu'une majorité de participants avait de grandes habitudes de lectures. Ainsi, les candidats les plus intéressés à une étude sur la compréhension du discours écrit sont évidemment ceux ayant ce type d'habitudes. Il s'agit malheureusement d'un biais fréquent dans ce type d'étude.

2. Compréhension du discours et modèles de plasticité cérébrale

Un autre objectif des présents travaux était de voir comment l'évolution des capacités de compréhension du discours pouvait s'inscrire dans les modèles connus de plasticité cérébrale lors du vieillissement.

D'abord, les données de neuroimagerie du premier article permettent de déterminer si l'évolution de la compréhension du discours, d'un point de vue neurofonctionnel, s'inscrit dans les modèles CRUNCH (Reuter-Lorenz et Cappell, 2008), PASA (Davis et al., 2008) ou HAROLD (Cabeza, 2002). Tel que décrit plutôt, la première étude observe principalement une augmentation avec l'âge de l'activité cérébrale dans le cortex préfrontal dorsolatéral gauche.

Cette suractivation pourrait principalement s'inscrire dans le modèle CRUNCH qui décrit qu'une suractivation de certaines régions, souvent en préfrontal, serait le signe d'une compensation, ou tentative de compensation, afin de bien réussir une tâche donnée. Il n'est pas surprenant que les

phénomènes observés dans la présente tâche puissent s'inscrire dans le modèle CRUNCH puisqu'il est le modèle le plus généraliste, ne parlant que de suractivation de régions que ce soit via des régions supplémentaires ou des régions équivalentes à celles utilisées chez les jeunes. D'ailleurs, les phénomènes décrits dans les modèles PASA et HAROLD pourraient pratiquement être considérés comme des cas particuliers du modèle de CRUNCH.

En fait, les données de la présente étude ne semblent correspondre ni au modèle PASA ni au modèle HAROLD. D'abord, ces données ne sont que partiellement liées au modèle PASA, puisque bien qu'une augmentation de l'activité cérébrale fut observée dans des régions antérieures, aucune diminution de l'activité cérébrale ne fut observée dans les régions postérieures. Il n'est pas impossible qu'une diminution aurait pu être observée si le casque utilisé avait couvert des régions plus postérieures comme le cortex occipital, bien que ces régions ne soient pas connues comme jouant un rôle dans la compréhension du discours.

Ensuite, il était impossible de tirer des conclusions à propos du modèle HAROLD, puisque, tant chez les participants âgés que chez les participants jeunes, l'activité cérébrale lors de la compréhension du discours semble être bilatérale. En fait, comme plusieurs processus cognitifs entrent en ligne de

compte pour effectuer une compréhension appropriée, il est peu surprenant que des régions des deux hémisphères soient impliquées.

Les présentes études, plus particulièrement celle portant sur l'impact du niveau de scolarité, permettent également de discuter des théories de la réserve cognitive (Stern, 2009) et de l'échafaudage cognitif (Park et Reuter-Lorenz, 2009). Ces deux théories tentent d'expliquer de quelle façon certaines personnes âgées réussissent à maintenir une cognition supérieure à la moyenne. Dans la première, c'est une réserve constituée tout au long de la vie qui en serait responsable tandis que, dans la deuxième, c'est une capacité à élaborer des échafaudages cognitifs qui permettrait ce maintien. Bien que différentes, ces deux théories se rejoignent sur plusieurs points dont l'influence importante de l'éducation dans le développement d'une grande réserve cognitive ou d'une plus grande capacité d'échafaudage cognitif.

Dans la présente étude, puisque le groupe de niveau universitaire et le groupe de niveau secondaire V ont obtenu des résultats très semblables à la tâche, et aux différents tests neuropsychologiques, en plus de démontrer une activité cérébrale comparable, il est possible de supposer qu'ils ont une réserve cognitive et/ou des capacités d'échafaudage également comparables. De prime abord, cela semble surprenant étant donné leur grande différence au niveau du temps passé à l'école. Par contre, il faut aussi considérer que, dans l'étude

discutée ici, les deux groupes avaient des habitudes de lecture et de loisirs également comparables.

En fait, à la lumière des présents résultats, il faut constater qu'une fois isolé, le niveau d'éducation ne semble plus être le meilleur facteur afin de prédire les performances à une tâche donnée dans une population vieillissante et que d'autres facteurs seraient peut-être mieux indiqués. Par exemple, dans la présente étude, lorsque les habitudes de lecture des deux groupes sont prises en considération, il n'est plus surprenant qu'ils obtiennent des résultats similaires à une tâche de compréhension du discours écrit. Dans le cadre d'une tâche expérimentale, il devient de plus en plus évident qu'il faut prendre en considération les habitudes d'activités cognitives qui peuvent être liées à cette tâche. Ces activités pourraient avoir un effet comparable à un effet d'entraînement à une tâche tel que discuté dans le troisième article.

Suite à ces observations, la question est donc maintenant de déterminer si l'éducation est réellement le meilleur déterminant de l'ampleur de la réserve cognitive d'un individu ou de ses capacités à promouvoir l'échafaudage cognitif. En fait, les habitudes stimulant la cognition tout au long de la vie pourraient avoir un bien plus grand impact que l'éducation. Par contre, une plus grande éducation favorise généralement ce genre d'habitudes entraînant souvent un emploi, des loisirs et des intérêts plus stimulants cognitivement. Il y a donc une certaine forme de redondance dans les facteurs influençant l'envergure de

la réserve cognitive puisque qu'ils sont pour la plupart interdépendants les uns des autres.

L'éducation jouant un grand rôle dans le bon développement des fonctions cognitives humaines, il est probable qu'elle ait un grand rôle dans le développement de la réserve cognitive. Cependant, il est possible que passé un certain âge, sans doute vers la fin de l'adolescence et du secondaire, cette influence diminue rapidement. Ainsi, lorsqu'un niveau secondaire est complété, les habitudes de vie deviendraient plus appropriées pour prédire l'ampleur du déclin cognitif accompagnant le vieillissement d'un individu. À cet égard, les études supérieures devraient être considérées au même titre qu'un emploi stimulant cognitivement.

À l'autre bout du spectre, la question pourrait se poser à savoir si la amplitude de la réserve cognitive ne serait pas plutôt innée et que les facteurs mentionnés seraient plutôt une conséquence d'une plus grande réserve cognitive. Ainsi, les individus ayant une plus grande réserve cognitive seraient plus enclins à poursuivre de longues études ou d'apprécier un emploi ou des loisirs plus exigeants cognitivement. C'est une hypothèse intéressante, bien que difficile à tester, qui démontre tout le travail encore nécessaire pour bien comprendre les capacités de plasticité cérébrale pas uniquement dans le vieillissement, mais tout au long de vie.

Il est intéressant de noter également que les deux groupes n'ont pas maintenu des habitudes de lecture similaires tout au long de leur vie. Alors que les participants ayant fréquenté l'université rapportent avoir eu de grandes habitudes de lecture depuis leur jeunesse, les participants ayant arrêté leurs études après le secondaire rapportent n'avoir commencé à lire davantage qu'à l'âge adulte, vers 40 ans. Cela démontre qu'il est toujours possible d'entraîner et d'améliorer une fonction cognitive comme la compréhension de lecture, malgré un âge plus avancé, et d'atteindre un niveau comparable à ceux ayant commencé beaucoup plus tôt dans leur vie. Par extension, il serait donc possible de promouvoir les capacités d'échafaudage cognitif afin de consolider et protéger certaines fonctions cognitives, dans ce cas-ci celles liées à la lecture, peu importe l'âge des individus. Il y a donc un intérêt majeur, dans notre société, à encourager la population vieillissante à développer et entretenir des habitudes stimulant leur cognition afin de préserver une grande qualité de vie.

La théorie de l'échafaudage cognitif mentionne que les fonctions cognitives les plus utilisées par un individu bénéficieraient de réseaux à la fois mieux développés et mieux protégés. La compréhension du discours étant une composante essentielle de la communication au quotidien, il se pourrait que les réseaux impliqués soient particulièrement bien protégés chez tous les individus peu importe leur profil. Ainsi, sur cet aspect, il est possible que ce qui a été discuté dans les derniers paragraphes ne puissent s'appliquer uniquement qu'à la compréhension du discours et que l'éducation ait une bien plus grande

influence sur d'autres fonctions cognitives. Par contre, la similarité des résultats obtenus aux tests neuropsychologiques permet de tendre davantage vers une possible généralisation.

Peu importe l'influence réelle ou non de ces facteurs sur la réserve cognitive ou les capacités d'échafaudage cognitif, les résultats présentés démontrent tout de même que dans n'importe quelle étude sur le vieillissement cognitif, l'ajout de questionnaires à propos des activités cognitivement stimulantes est préférable afin de maximiser l'information pouvant influencer les performances ou le profil d'activité cérébrale des différents groupes. Ces informations sont précieuses, car les effets du vieillissement sont difficiles à prévoir et la variabilité entre les individus est très grande.

3. Perspectives d'avenir

Avant tout, il est important de noter que la tâche utilisée, tel que démontré par les résultats, est pertinente pour étudier la compréhension du discours écrit. Cette tâche relève le difficile défi de trouver un équilibre entre les paramètres nécessaires à l'évaluation des capacités de compréhension et les nombreuses contraintes liées à la neuroimagerie. Par exemple, l'utilisation de courts textes permettait à la fois de réduire l'impact de la mémoire de travail et d'avoir une durée de lecture plus constante d'un participant à l'autre, engendrant ainsi une période d'activité cérébrale plus comparable en termes de

durée. Cependant, dans de futures études, il serait intéressant d'évaluer un niveau plus complexe de compréhension écrite tout en conservant une tâche compatible avec la neuroimagerie.

D'abord, le nombre de textes et d'affirmations utilisés dans la tâche (36 au total) était limité par la technique de NIRS qui demande un temps assez long entre chaque stimulus engendrant un temps de passation total de 39 minutes sans compter les pauses entre les blocs et les explications. Une durée plus longue aurait sans doute rendu la tâche trop épuisante pour plusieurs sujets. Le protocole s'est également limité à une affirmation par texte pour réduire au maximum la durée totale de la tâche. Cependant, maintenant que les présentes études confirment l'absence de différences entre les différents niveaux de compréhension, d'un point de vue de l'activité cérébrale sous-jacente, des modifications pourraient être apportées pour peaufiner l'évaluation des capacités de compréhension sans nuire à l'estimation de l'activité cérébrale.

En effet, vu les observations décrites précédemment, il devient possible de regrouper les trois conditions pour l'aspect neuroimagerie et de classer uniquement les affirmations selon le niveau de compréhension correspondant pour la partie comportementale de l'étude. Ainsi, il serait intéressant de réduire le nombre de textes, probablement autour de 24, et d'augmenter le nombre d'affirmations à trois par texte. De cette façon, il y aurait 72 affirmations plutôt que 36. Cela permettrait d'augmenter la fiabilité des résultats concernant les

capacités de compréhension de chaque niveau en doublant le nombre d'affirmations à répondre. Le temps de passation total plus court améliorerait également la qualité des données NIRS en réduisant la fatigue des participants et ainsi les mouvements de ces derniers.

Il serait également intéressant de laisser plus de temps entre les textes et les affirmations afin que les concentrations d'hémoglobine puissent retourner à la normale suite à la lecture des textes. Afin de mitiger l'impact un peu plus grand que la mémoire de travail aurait alors sur le rappel de la microstructure, il serait envisageable de varier le délai entre le texte et l'affirmation, certains items seraient donc plus adaptés aux besoins de la NIRS et d'autres au rappel de la microstructure.

Une autre possibilité serait de séparer chaque texte en deux ou trois événements plus courts qui apparaîtraient un à la suite de l'autre, puis de moyenniser l'activité cérébrale de chacun de ces courts événements. Des événements plus courts permettraient à la fois d'augmenter leur nombre et de standardiser davantage le temps de lecture. En effet, dans l'étude actuelle, le temps nécessaire à la lecture semblait varier beaucoup d'un participant à l'autre ce qui a pu ultimement influencer la durée de leurs réponses hémodynamiques respectives. Cependant, bien que cela permettrait d'augmenter la puissance statistique pour la partie neuroimagerie de l'étude, cela compliquerait probablement davantage l'évaluation de la partie comportementale.

Un autre aspect qu'il serait intéressant de faire varier dans une future étude est la longueur des textes. En effet, bien que des textes courts soient bénéfiques pour diminuer l'influence de la mémoire de travail sur le rappel de la microstructure, les données de la présente thèse suggèrent que ce type de texte pourrait rendre plus difficile la construction appropriée et complète du modèle de situation. Des textes plus longs, demandant un plus grand effort, pourraient également permettre d'accentuer l'effet des habitudes de lecture, car les niveaux supérieurs de compréhension seraient davantage sollicités. Des textes plus longs permettraient aussi de présenter la tâche sous une forme plus près du quotidien des participants, par exemple sous forme d'articles de journaux.

Cependant, des textes longs sont beaucoup plus difficiles à gérer dans un contexte de neuroimagerie. La solution serait de développer une tâche hybride où une succession de textes courts, comparables à ceux présentés dans la tâche actuelle, forment en réalité une histoire beaucoup plus longue. Ces textes pourraient même être entrecoupés de questions. Les questions portant sur la microstructure pourraient être souvent situées peu de temps après la présentation des micropropositions concernées, réduisant l'impact de la mémoire de travail. Ce format permettrait de mieux évaluer les capacités de généralisation, d'inférences et d'intégration des différents éléments composant le modèle de situation dans un texte plus complexe et peut-être plus proche du genre de texte rencontré aux quotidiens.

Des affirmations ayant pour réponses vrai ou faux avaient été choisies afin de diminuer le mouvement lors de la réponse, et ainsi les artefacts de mouvements, lors de la captation des données de neuroimagerie. Le désavantage engendré est qu'un participant a 50% des chances d'avoir une bonne réponse même s'il n'a pas bien compris le texte. Il serait intéressant d'explorer, si cela n'augmente pas trop le mouvement, la possibilité d'ajouter un bouton « je ne peux savoir » qui pourrait être associé à des affirmations servant de distracteurs afin de réduire les chances d'avoir la bonne réponse sans avoir compris le texte.

Malgré les modifications possibles discutées précédemment, la tâche et les protocoles présentés dans cette thèse demeurent solides. D'ailleurs, ils servent présentement de base à l'élaboration d'un test clinique qui devrait être inclus dans une batterie d'évaluation linguistique et fonctionnelle des troubles acquis de la communication à destination des orthophonistes francophones (mise à jour du Montréal-Toulouse 86). Ce test visera à évaluer les capacités de compréhension du discours écrit et oral en utilisant des courts textes, inspirés par ceux utilisés dans cette thèse, suivi de trois questions par texte. Ce test permettra d'évaluer les capacités d'inférences logiques (intégration), d'inférences pragmatiques (optionnelles) et de rappel d'informations explicites des patients.

Il aurait été intéressant dans la partie de l'étude portant sur le niveau de scolarité d'avoir un troisième groupe de personnes âgées n'ayant pas atteint le niveau de secondaire V (moins de 11 ans de scolarité) afin de mieux cerner le sujet. Au début de l'étude, il était prévu de former un groupe ayant fréquenté l'université et un groupe ne l'ayant pas fréquenté composé de participants ayant un secondaire V ou moins. Cependant, le recrutement, via principalement la banque de participants du CRIUGM et par des affiches, n'a pas permis de trouver suffisamment des participants n'ayant pas complété un secondaire V ou un équivalent pour former un groupe mixte équilibré. Les personnes âgées peu scolarisées constituent un groupe très difficile à recruter, car ils sont souvent plus craintifs face à la recherche et peu intéressés par cette dernière.

L'étude présentée démontre tout de même la nécessité de différencier davantage les participants ayant un secondaire V de ceux ayant une scolarité moindre. Dans le contexte de notre étude, ce groupe s'est avéré en tout point comparable au groupe ayant plusieurs années de scolarité de plus. Même si les biais possibles sont considérés comme le fait que les participants intéressés par la recherche sont souvent également plus stimulés cognitivement dans leur quotidien, il en demeure que plusieurs participants ayant qu'un secondaire V préserve tout de même une cognition semblable à celle de participants ayant effectué des études universitaires.

Ainsi, le groupe des individus ayant cessé l'école après le secondaire constitue minimalement un groupe intermédiaire où certains maintiennent une cognition tout à fait adéquate dans le vieillissement. Il se peut qu'une fois ce niveau de scolarité atteint, les habitudes de vie jouent un plus grand rôle dans le maintien de la cognition. La scolarité de niveau secondaire serait donc potentiellement suffisante pour bien développer les bases de la cognition humaine et qu'une vie stimulante cognitivement, que ce soit par des études supérieures, un emploi ou des loisirs, soit la véritable clé de la conservation des capacités cognitives dans le vieillissement. Cet aspect de développement des fonctions cognitives vient renforcer l'intérêt d'un niveau de fréquentation scolaire minimal fixé à l'âge de 16 ans, soit environ un cinquième secondaire.

Plusieurs études seront encore nécessaires pour cerner l'évolution des capacités de compréhension du discours dans le vieillissement et l'influence de l'éducation sur les fonctions cognitives. Ici, il fut surtout question de modifications possibles pour créer une tâche en continuité avec l'étude présentée. Cependant, plusieurs autres aspects du discours pourraient éventuellement faire l'objet d'études comme le type de discours (par exemple : narratif, explicatif ou procédural) ou les aspects plus pragmatiques ou prosodiques du discours. Du côté de l'éducation, il fut surtout question du nombre d'années passées sur les bancs d'école, mais la qualité ou le type de programme suivi, tant au secondaire qu'à l'université, sont également des facteurs qui mériteraient une plus grande attention dans de futures études.

4. Conclusion

Les travaux de cette thèse ont permis de mieux comprendre l'évolution des capacités de compréhension du discours écrit au cours du vieillissement normal. D'abord, d'un point de vue comportemental, il a été observé que les participants plus âgés avaient davantage de difficulté, lors de la lecture de courts textes, avec le rappel de la microstructure (les détails composant le texte) et du modèle de situation (intégration des éléments du texte et inférence des connaissances antérieures du lecteur), mais qu'ils maintenaient des capacités comparables aux plus jeunes en matière de rappel de la macrostructure (essentiel du texte et généralisation). Le résultat concernant le modèle de situation était inattendu, mais il peut s'expliquer par l'utilisation de courts textes dans la tâche ne contenant pas suffisamment d'informations pour bien consolider le modèle de situation.

Ensuite, les données d'imagerie optique ont permis de constater que les personnes âgées avaient une plus grande activité cérébrale dans le cortex préfrontal gauche, en particulier dans la région dorsolatérale, que les plus jeunes lors de la lecture des textes. Cette plus grande activité est un signe de stratégie compensatrice liée au vieillissement cognitif pouvant trouver écho dans les phénomènes décrits par le modèle CRUNCH. Chez les personnes âgées, des indices portent à croire que l'ampleur de l'activité cérébrale du cortex préfrontal dorsolatéral gauche lors de la compréhension du discours pourrait

être corrélée avec les habitudes de lecture. Ces deux résultats démontrent l'importance du cortex préfrontal dorsolatéral gauche dans la modulation des processus cérébraux liés à la compréhension. Les résultats de neuroimagerie confirment également l'interdépendance des différents niveaux de compréhension et la simultanéité des processus impliqués dans les cycles de construction-intégration du modèle de Kintsch.

Subséquentement, cette thèse a également permis d'observer que le niveau d'éducation, passé un secondaire V, n'a pas d'influence sur les capacités de compréhension du discours écrit ou sur l'activité cérébrale s'y rattachant lors du vieillissement lorsque les autres facteurs cognitifs pouvant influencer la plasticité cérébrale sont contrôlés. Une attention particulière fut portée aux habitudes de lecture en raison du lien évident qu'elles entretiennent avec la tâche présentée. Puisqu'une plus longue éducation promeut des habitudes de vie cognitivement plus stimulantes, via notamment des emplois et des intérêts plus intellectuels, elle peut toujours être considérée comme un prédicteur des conséquences du vieillissement cognitif d'un individu. Cependant, d'autres facteurs doivent être pris en considération pour une prédiction plus fiable. Ainsi, un vieillissement cognitif harmonieux serait donc principalement le fruit d'une vie stimulante sur le plan cognitif et non qu'un résultat prédéterminé par un nombre d'année d'études.

Finalement, la présente thèse propose des résultats intéressants pour la suite de l'étude de l'évolution de la compréhension du discours à travers le vieillissement humain en ayant établi des bases avec des textes somme toute assez simple. D'autres études demeurent nécessaires afin de cerner l'entièreté du sujet. Notamment les différentes capacités de compréhension découlant du modèle de situation, comme les capacités de mise à jour du modèle, d'intégration des informations et d'inférences à partir du texte et des connaissances antérieures, pourraient faire l'objet d'une étude afin de mieux discerner leur évolution au cours du vieillissement. Malgré la complexité des processus impliqués, la compréhension du discours demeure une composante primordiale de la communication humaine d'où l'importance de sa bonne préservation dans le vieillissement. Nos interactions sociales dépendent de cette capacité d'extraire l'essentiel d'un discours, d'intégrer l'information et de la mettre en relation avec nos connaissances personnelles.

Bibliographie

- ANSADO, J., MARSOLAIS, Y., METHQAL, I., ALARY, F. & JOANETTE, Y. (2013). The adaptive aging brain: evidence from the preservation of communication abilities with age. *Eur J Neurosci*, 37, 1887-95.
- ANSADO, J., MONCHI, O., ENNABIL, N., FAURE, S. & JOANETTE, Y. (2012). Load-dependent posterior-anterior shift in aging in complex visual selective attention situations. *Brain Res*, 1454, 14-22.
- ARDILA, A., OSTROSKY-SOLIS, F., ROSSELLI, M. & GOMEZ, C. (2000). Age-related cognitive decline during normal aging: the complex effect of education. *Arch Clin Neuropsychol*, 15, 495-513.
- BERLINGERI, M., DANELLI, L., BOTTINI, G., SBERNA, M. & PAULESU, E. (2013). Reassessing the HAROLD model: is the hemispheric asymmetry reduction in older adults a special case of compensatory-related utilisation of neural circuits? *Exp Brain Res*, 224, 393-410.
- BREBION, G. (2003). Working memory, language comprehension, and aging: four experiments to understand the deficit. *Exp Aging Res*, 29, 269-301.
- BRÉBION, G., SMITH, M. J. & EHRLICH, M. F. (1997). Working memory and aging: Deficit or strategy differences? *Aging, Neuropsychology, and Cognition: A Journal on Normal and Dysfunctional Development*, 4, 58-73.
- BRICKMAN, A. M., SIEDLECKI, K. L., MURASKIN, J., MANLY, J. J., LUCHSINGER, J. A., YEUNG, L. K., BROWN, T. R., DECARLI, C. & STERN, Y. (2009). White matter hyperintensities and cognition: Testing the reserve hypothesis. *Neurobiol Aging*.
- BURKE, S. N. & BARNES, C. A. (2006). Neural plasticity in the ageing brain. *Nat Rev Neurosci*, 7, 30-40.
- CABEZA, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in older adults: the HAROLD model. *Psychol Aging*, 17, 85-100.
- CABEZA, R., ANDERSON, N. D., LOCANTORE, J. K. & MCINTOSH, A. R. (2002). Aging gracefully: compensatory brain activity in high-performing older adults. *Neuroimage*, 17, 1394-402.

- CAMPION, N. & ROSSI, J.-P. (1999). Inférences et compréhension de texte. *L'année psychologique*, 99, 493-527.
- CAO, Y., VIKINGSTAD, E. M., GEORGE, K. P., JOHNSON, A. F. & WELCH, K. M. (1999). Cortical language activation in stroke patients recovering from aphasia with functional MRI. *Stroke*, 30, 2331-40.
- CAPPELL, K. A., GMEINDL, L. & REUTER-LORENZ, P. A. (2010). Age differences in prefrontal recruitment during verbal working memory maintenance depend on memory load. *Cortex*, 46, 462-73.
- CARP, J., GMEINDL, L. & REUTER-LORENZ, P. A. (2010). Age differences in the neural representation of working memory revealed by multi-voxel pattern analysis. *Front Hum Neurosci*, 4, 217.
- CHESNEAU, S. (2007). *Effets du vieillissement et d'une lésion cérébrale gauche sur la compréhension de textes*. PhD, Université de Montréal.
- CHESNEAU, S., JBABDI, S., CHAMPAGNE-LAVAU, M., GIROUX, F. & SKA, B. (2007a). [Text comprehension, cognitive resources and aging]. *Psychol Neuropsychiatr Vieil*, 5, 47-64.
- CHESNEAU, S., ROY, M.-C. & SKA, B. (2007b). [Evaluation of text comprehension based on a theoretical model]. *Revue canadienne d'orthophonie et d'audiologie*, 31, 83-93.
- CHRISTENSEN, H., KORTEN, A. E., JORM, A. F., HENDERSON, A. S., JACOMB, P. A., RODGERS, B. & MACKINNON, A. J. (1997). Education and decline in cognitive performance: compensatory but not protective. *Int J Geriatr Psychiatry*, 12, 323-30.
- COOPER, J. A., WORTHY, D. A., GORLICK, M. A. & MADDOX, W. T. (2013). Scaffolding across the lifespan in history-dependent decision-making. *Psychol Aging*, 28, 505-14.
- DAVIS, S. W., DENNIS, N. A., DASELAAR, S. M., FLECK, M. S. & CABEZA, R. (2008). Que PASA? The posterior-anterior shift in aging. *Cereb Cortex*, 18, 1201-9.

- DEDE, G., CAPLAN, D., KEMTES, K. & WATERS, G. (2004). The relationship between age, verbal working memory, and language comprehension. *Psychol Aging*, 19, 601-16.
- DEHAENE, S. & COHEN, L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends Cogn Sci*, 15, 254-62.
- DENHIÈRE, G. & BAUDET, S. (1992). *Lecture, compréhension de texte et science cognitive*, Paris, PUF.
- DEWITT, I. & RAUSCHECKER, J. P. (2013). Wernicke's area revisited: parallel streams and word processing. *Brain Lang*, 127, 181-91.
- DOLCOS, F., RICE, H. J. & CABEZA, R. (2002). Hemispheric asymmetry and aging: right hemisphere decline or asymmetry reduction. *Neurosci Biobehav Rev*, 26, 819-25.
- DUONG, A. (2002). *Analyse cognitivo-linguistique du discours chez les personnes atteintes de la démence de type Alzheimer*. Ph. D., Université de Montréal.
- ERICSSON, K. A. & KINTSCH, W. (1995). Long-term working memory. *Psychol Rev*, 102, 211-45.
- ESTEVE, M. E. & GIL, A. C. (2013). [Reading as a protective factor against cognitive decline]. *Gac Sanit*, 27, 68-71.
- EYLER, L. T., SHERZAI, A., KAUP, A. R. & JESTE, D. V. (2011). A review of functional brain imaging correlates of successful cognitive aging. *Biol Psychiatry*, 70, 115-22.
- FARKAS, E. & LUITEN, P. G. (2001). Cerebral microvascular pathology in aging and Alzheimer's disease. *Prog Neurobiol*, 64, 575-611.
- FERRE, P., SKA, B., LAJOIE, C., BLEAU, A. & JOANETTE, Y. (2011). Clinical Focus on Prosodic, Discursive and Pragmatic Treatment for Right Hemisphere Damaged Adults: What's Right? *Rehabil Res Pract*, 2011, 131820.
- FERSTL, E. C., NEUMANN, J., BOGLER, C. & VON CRAMON, D. Y. (2008). The extended language network: a meta-analysis of

- neuroimaging studies on text comprehension. *Hum Brain Mapp*, 29, 581-93.
- FINCHAM, J. M. & ANDERSON, J. R. (2006). Distinct roles of the anterior cingulate and prefrontal cortex in the acquisition and performance of a cognitive skill. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 103, 12941-6.
- GAETA, H., FRIEDMAN, D., RITTER, W. & CHENG, J. (2001). An event-related potential evaluation of involuntary attentional shifts in young and older adults. *Psychol Aging*, 16, 55-68.
- GINESTE, M.-D. & LE NY, J.-F. (2002). *Psychologie cognitive du langage : De la reconnaissance à la compréhension*.
- GRADY, C. L., MAISOG, J. M., HORWITZ, B., UNGERLEIDER, L. G., MENTIS, M. J., SALERNO, J. A., PIETRINI, P., WAGNER, E. & HAXBY, J. V. (1994). Age-related changes in cortical blood flow activation during visual processing of faces and location. *J Neurosci*, 14, 1450-62.
- GRATTON, G. & FABIANI, M. (2007). Optical imaging of brain function. In: PARASURAMAN, R. & RIZZO, M. (eds.) *Neuroergonomics : the brain at work*. Oxford ; Toronto: Oxford University Press.
- GREENWOOD, P. M. (2007). Functional plasticity in cognitive aging: review and hypothesis. *Neuropsychology*, 21, 657-73.
- HAUK, O. & PULVERMULLER, F. (2004). Neurophysiological distinction of action words in the fronto-central cortex. *Hum Brain Mapp*, 21, 191-201.
- HEAD, D., BUCKNER, R. L., SHIMONY, J. S., WILLIAMS, L. E., AKBUDAK, E., CONTURO, T. E., MCAVOY, M., MORRIS, J. C. & SNYDER, A. Z. (2004). Differential vulnerability of anterior white matter in nondemented aging with minimal acceleration in dementia of the Alzheimer type: evidence from diffusion tensor imaging. *Cereb Cortex*, 14, 410-23.
- HOMMEL, B., LI, K. Z. & LI, S. C. (2004). Visual search across the life span. *Dev Psychol*, 40, 545-58.

- HOSHI, Y. (2003). Functional near-infrared optical imaging: utility and limitations in human brain mapping. *Psychophysiology*, 40, 511-20.
- HOSHI, Y. (2007). Functional near-infrared spectroscopy: current status and future prospects. *J Biomed Opt*, 12, 062106.
- HOWARD, D. V., SHAW, R. J. & HEISEY, J. G. (1986). Aging and the time course of semantic activation. *J Gerontol*, 41, 195-203.
- HULTSCH, D. F., MACDONALD, S. W. & DIXON, R. A. (2002). Variability in reaction time performance of younger and older adults. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci*, 57, P101-15.
- JOHNSON-LAIRD, P. N., BYRNE, R. M. & SCHAEKEN, W. (1992). Propositional reasoning by model. *Psychol Rev*, 99, 418-39.
- JONES, R. N., FONG, T. G., METZGER, E., TULEBAEV, S., YANG, F. M., ALSOP, D. C., MARCANTONIO, E. R., CUPPLES, L. A., GOTTLIEB, G. & INOUE, S. K. (2010). Aging, brain disease, and reserve: implications for delirium. *Am J Geriatr Psychiatry*, 18, 117-27.
- KELLY, A. M., & GARAVAN, H. (2005). Human functional neuroimaging of brain changes associated with practice. *Cerebral Cortex*, 15, 1089–1102.
- KILAVIK, B. E., CONFAIS, J. & RIEHLE, A. (2014). Signs of timing in motor cortex during movement preparation and cue anticipation. *Adv Exp Med Biol*, 829, 121-42.
- KINTSCH, W. (1988). The role of knowledge in discourse comprehension: a construction-integration model. *Psychol Rev*, 95, 163-82.
- KINTSCH, W. & VAN DIJK, T. A. (1978). Toward a Model of Text Comprehension and Production. *Psychological Review*, 85, 363-394.
- LACHMAN, M. E., AGRIGOROAEI, S., MURPHY, C. & TUN, P. A. (2010). Frequent cognitive activity compensates for education differences in episodic memory. *Am J Geriatr Psychiatry*, 18, 4-10.
- LE NY, J.-F. (1979). *La Sémantique psychologique*, Paris, PUF.
- LEMAIRE, P. & BHERER, L. (2005). *Psychologie du vieillissement. Une perspective cognitive*, Bruxelles, de Boeck.

- LOPEZ-HIGES, R., RUBIO VALDEHITA, S., MARTIN ARAGONESES, M. T. & DEL RIO, D. (2010). Interindividual variability in vocabulary, sentence comprehension and working memory in the elderly: effects of cognitive deterioration. *Span J Psychol*, 13, 75-87.
- MACKENZIE, C. (2000). The relevance of education and age in the assessment of discourse comprehension. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 14, 151-161.
- MADDEN, D. J. (2007). Aging and Visual Attention. *Curr Dir Psychol Sci*, 16, 70-74.
- MANDRICK, K. (2013). *Application de la spectroscopie proche infrarouge dans la discrimination de la charge de travail*. Université Montpellier I.
- MAR, R. A. (2004). The neuropsychology of narrative: story comprehension, story production and their interrelation. *Neuropsychologia*, 42, 1414-34.
- MAURY, P., BESSE, F. & MARTIN, S. (2010). Age differences in outdated information processing during news reports reading. *Exp Aging Res*, 36, 371-92.
- MAZOYER, B. M., TZOURIO, N., FRAK, V., SYROTA, A., MURAYAMA, N., LEVRIER, O., SALAMON, G., DEHAENE, S., COHEN, L. & MEHLER, J. (1993). The cortical representation of speech. *J Cogn Neurosci*, 5, 467-79.
- MCCANDLISS, B. D., COHEN, L. & DEHAENE, S. (2003). The visual word form area: expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends Cogn Sci*, 7, 293-299.
- MOSS, J. & SCHUNN, C. D. (2015). Comprehension through explanation as the interaction of the brain's coherence and cognitive control networks. *Front Hum Neurosci*, 9, 562.
- MOSS, J., SCHUNN, C. D., SCHNEIDER, W., MCNAMARA, D. S. & VANLEHN, K. (2011). The neural correlates of strategic reading comprehension: cognitive control and discourse comprehension. *Neuroimage*, 58, 675-86.

- NILSSON, L. G. (2003). Memory function in normal aging. *Acta Neurol Scand Suppl*, 179, 7-13.
- OBERAUER, K., WENDLAND, M. & KLIEGL, R. (2003). Age differences in working memory--the roles of storage and selective access. *Mem Cognit*, 31, 563-9.
- PARENTE, M. A. M. P., FONSECA, R. P. & SCHERER, L. C. (2008). Literacy as a determining factor for brain organization: from Lecours' contribution to the recent days. *Dement. Neuropsychol.*, 2, 165-172.
- PARK, D. C. & BISCHOF, G. N. (2013). The aging mind: neuroplasticity in response to cognitive training. *Dialogues Clin Neurosci*, 15, 109-19.
- PARK, D. C. & REUTER-LORENZ, P. (2009). The adaptive brain: aging and neurocognitive scaffolding. *Annu Rev Psychol*, 60, 173-96.
- PARK, D. C., SMITH, A. D., LAUTENSCHLAGER, G., EARLES, J. L., FRIESKE, D., ZWAHR, M. & GAINES, C. L. (1996). Mediators of long-term memory performance across the life span. *Psychol Aging*, 11, 621-37.
- PERFETTI, C. A. & FRISHKOFF, G. A. (2008). The Neural Bases of Text and Discourse Processing. In: STEMMER, B. & WHITAKER, H. A. (eds.) *Handbook of the Neuroscience of Language*. London: Academic Press.
- PERRIG, W. & KINTSCH, W. (1985). Propositional and situational representations of a text. *Journal of Memory and Language*, 24, 503-518.
- PURVES, D., AUGUSTINE, G. J., FITZPATRICK, D., HALL, W. C., LAMANTIA, A.-S., MCNAMARA, J. O. & WILLIAMS, S. M. (2005). *Neurosciences*, Bruxelles, De Boeck Université.
- RADVANSKY, G. (1999a). Aging, memory and comprehension. *Curr Dir Psychol Sci*, 8, 49-53.
- RADVANSKY, G. & COPELAND, D. (2006). Memory retrieval and interference: Working memory issues. *Journal of Memory and Language*, 55, 33-46.

- RADVANSKY, G. A. (1999b). Memory retrieval and suppression: the inhibition of situation models. *J Exp Psychol Gen*, 128, 563-79.
- RADVANSKY, G. A. & COPELAND, D. E. (2001). Working memory and situation model updating. *Mem Cognit*, 29, 1073-80.
- RADVANSKY, G. A. & COPELAND, D. E. (2004). Working memory span and situation model processing. *Am J Psychol*, 117, 191-213.
- RADVANSKY, G. A. & DIJKSTRA, K. (2007). Aging and situation model processing. *Psychon Bull Rev*, 14, 1027-42.
- RADVANSKY, G. A., ZACKS, R. T. & HASHER, L. (1996). Fact retrieval in younger and older adults: the role of mental models. *Psychol Aging*, 11, 258-71.
- RADVANSKY, G. A., ZWAAN, R. A., CURIEL, J. M. & COPELAND, D. E. (2001). Situation Models and Aging. *Psychol Aging*, 16, 145-160.
- RAZ, N., LINDENBERGER, U., RODRIGUE, K. M., KENNEDY, K. M., HEAD, D., WILLIAMSON, A., DAHLE, C., GERSTORF, D. & ACKER, J. D. (2005). Regional brain changes in aging healthy adults: general trends, individual differences and modifiers. *Cereb Cortex*, 15, 1676-89.
- REUTER-LORENZ, P. A. & CAPPELL, K. A. (2008). Neurocognitive Aging and the Compensation Hypothesis. *Curr Dir Psychol Sci*, 17, 177-182.
- RIDDLE, D. R., SONNTAG, W. E. & LICHTENWALNER, R. J. (2003). Microvascular plasticity in aging. *Ageing Res Rev*, 2, 149-68.
- ROBERTSON, D. A., GERNSBACHER, M. A., GUIDOTTI, S. J., ROBERTSON, R. R., IRWIN, W., MOCK, B. J. & CAMPANA, M. E. (2000). Functional neuroanatomy of the cognitive process of mapping during discourse comprehension. *Psychol Sci*, 11, 255-60.
- RODDEN, F. A. & STEMMER, B. (2008). A Brief Introduction to Common Neuroimaging Techniques. In: STEMMER, B. & WHITAKER, H. A. (eds.) *Handbook of the Neuroscience of Language*. London: Academic Press

- SAFI, D., LASSONDE, M., NGUYEN, D. K., VANNASING, P., TREMBLAY, J., FLOREA, O., MORIN-MONCET, O., LEFRANCOIS, M. & BELAND, R. (2012). Functional near-infrared spectroscopy for the assessment of overt reading. *Brain Behav*, 2, 825-37.
- SAFONOVA, L. P., MICHALOS, A., WOLF, U., WOLF, M., HUEBER, D. M., CHOI, J. H., GUPTA, R., POLZONETTI, C., MANTULIN, W. W. & GRATTON, E. (2004). Age-correlated changes in cerebral hemodynamics assessed by near-infrared spectroscopy. *Arch Gerontol Geriatr*, 39, 207-25.
- SALAT, D. H., BUCKNER, R. L., SNYDER, A. Z., GREVE, D. N., DESIKAN, R. S., BUSA, E., MORRIS, J. C., DALE, A. M. & FISCHL, B. (2004). Thinning of the cerebral cortex in aging. *Cereb Cortex*, 14, 721-30.
- SALTHOUSE, T. A. (1993). Speed and knowledge as determinants of adult age differences in verbal tasks. *J Gerontol*, 48, P29-36.
- SALTHOUSE, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychol Rev*, 103, 403-28.
- SCHERER, L. C., FONSECA, R. P., GIROUX, F., SENHADJI, N., MARCOTTE, K., TOMITCH, L. M., BENALI, H., LESAGE, F., SKA, B. & JOANETTE, Y. (2012). Neurofunctional (re)organization underlying narrative discourse processing in aging: evidence from fNIRS. *Brain Lang*, 121, 174-84.
- SCHMALHOFER, F. & PERFETTI, C. A. (2007). Neural and behavioral indicators of integration processes across sentence boundaries. In: SCHMALHOFER, F. & PERFETTI, C. A. (eds.) *Higher level language processes in the brain: Inference and comprehension processes*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- SCHNEIDER-GARCES, N. J., GORDON, B. A., BRUMBACK-PELTZ, C. R., SHIN, E., LEE, Y., SUTTON, B. P., MACLIN, E. L., GRATTON, G.

- & FABIANI, M. (2010). Span, CRUNCH, and beyond: working memory capacity and the aging brain. *J Cogn Neurosci*, 22, 655-69.
- SEVUSH, S., ROELTGEN, D. P., CAMPANELLA, D. J. & HEILMAN, K. M. (1983). Preserved oral reading in Wernicke's aphasia. *Neurology*, 33, 916-20.
- SHANKAR, S. K. (2010). Biology of aging brain. *Indian J Pathol Microbiol*, 53, 595-604.
- SKA, B. & DUONG, A. (2005). [Communication, discourse and dementia]. *Psychol Neuropsychiatr Vieil*, 3, 125-33.
- SOLE-PADULLES, C., BARTRES-FAZ, D., JUNQUE, C., VENDRELL, P., RAMI, L., CLEMENTE, I. C., BOSCH, B., VILLAR, A., BARGALLO, N., JURADO, M. A., BARRIOS, M. & MOLINUEVO, J. L. (2009). Brain structure and function related to cognitive reserve variables in normal aging, mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Neurobiol Aging*, 30, 1114-24.
- SPRINGER, M. V., MCINTOSH, A. R., WINOCUR, G. & GRADY, C. L. (2005). The relation between brain activity during memory tasks and years of education in young and older adults. *Neuropsychology*, 19, 181-92.
- STAFF, R. T., MURRAY, A. D., DEARY, I. J. & WHALLEY, L. J. (2004). What provides cerebral reserve? *Brain*, 127, 1191-9.
- STERN, Y. (2002). What is cognitive reserve? Theory and research application of the reserve concept. *J Int Neuropsychol Soc*, 8, 448-60.
- STERN, Y. (2009). Cognitive reserve. *Neuropsychologia*, 47, 2015-28.
- STRANGMAN, G., BOAS, D. A. & SUTTON, J. P. (2002). Non-invasive neuroimaging using near-infrared light. *Biol Psychiatry*, 52, 679-93.
- STRANGMAN, G., FRANCESCHINI, M. A. & BOAS, D. A. (2003). Factors affecting the accuracy of near-infrared spectroscopy concentration calculations for focal changes in oxygenation parameters. *Neuroimage*, 18, 865-79.

- TUN, P. A., WINGFIELD, A. & STINE, E. A. (1991). Speech-processing capacity in young and older adults: a dual-task study. *Psychol Aging*, 6, 3-9.
- VAN DER LINDEN, M., HUPET, M., FEYEREISEN, P., SCHAELESTRAETE, M.-A., BESTGEN, Y., BRUYER, R., LORIES, G., EL AHMADI, A. & SERON, X. (1999). Cognitive Mediators of Age-Related Differences in Language Comprehension and Verbal Memory Performance. *Aging, Neuropsychology, and Cognition: A Journal on Normal and Dysfunctional Development*, 6, 32-55.
- VAN DIJK, T. A. (1987). Episodic models in discourse processing. In: HOROWITZ, R. & SAMUELS, S. J. (eds.) *Comprehending oral and written language*. New York: Academic Press.
- VAN DIJK, T. A. & KINTSCH, W. (1983). *Strategies of discourse comprehension*, New York, Academic Press.
- VERHAEGHEN, P., MARCOEN, A. & GOOSSENS, L. (1993). Facts and fiction about memory aging: a quantitative integration of research findings. *J Gerontol*, 48, P157-71.
- VILLRINGER, A. & CHANCE, B. (1997). Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function. *Trends Neurosci*, 20, 435-42.
- WILCOX, T., BORTFELD, H., WOODS, R., WRUCK, E., ARMSTRONG, J. & BOAS, D. (2009). Hemodynamic changes in the infant cortex during the processing of featural and spatiotemporal information. *Neuropsychologia*, 47, 657-62.
- WONG, D. F., YOUNG, D., WILSON, P. D., MELTZER, C. C. & GJEDDE, A. (1997). Quantification of neuroreceptors in the living human brain: III. D2-like dopamine receptors: theory, validation, and changes during normal aging. *J Cereb Blood Flow Metab*, 17, 316-30.
- YLIKOSKI, R., YLIKOSKI, A., ERKINJUNTTI, T., SULKAVA, R., KESKIVAARA, P., RAININKO, R. & TILVIS, R. (1998). Differences in neuropsychological functioning associated with age, education,

neurological status, and magnetic resonance imaging findings in neurologically healthy elderly individuals. *Appl Neuropsychol*, 5, 1-14.

ZACKS, R. T., RADVANSKY, G. & HASHER, L. (1996). Studies of directed forgetting in older adults. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 22, 143-56.

Annexes

ANNEXE I – Textes de la tâche de compréhension du discours

Liste des 12 textes du bloc portant sur les micropropositions

Histoire : Alain prenait l'avion pour la première fois. Il allait rejoindre ses grands-parents à Paris. Il a été soulagé lorsqu'une hôtesse lui a pris la main, l'a dirigé vers son siège et l'a invité à visiter la cabine de pilotage un peu plus tard.

Affirmation : Alain s'est senti rassuré lorsque l'hôtesse lui a pris la main.

Réponse : VRAI

Histoire : Christophe se déplace uniquement à vélo pour maintenir sa forme physique. Ce matin, il doit partir rapidement à son travail. Il découvre que les pneus de son vélo sont crevés. Christophe doit se rendre à l'arrêt d'autobus immédiatement.

Affirmation : Christophe est pressé de se rendre à son travail.

Réponse : VRAI

Histoire : Claire est heureuse parce que son ami Marc l'a appelée. Ils ne se sont pas vus depuis plusieurs semaines. Ils se sont donnés rendez-vous. Elle se dépêche pour se rendre à l'endroit convenu. Arrivée la première, elle entre, s'assoit et lit le menu.

Affirmation : Claire est nerveuse parce qu'elle doit rencontrer Marc.

Réponse : FAUX

Histoire : Depuis qu'elle est petite, Nathalie croit en Dieu et est pratiquante. Elle va à l'église chaque dimanche avec sa famille. Le curé de la paroisse connaît bien Nathalie. Elle participe régulièrement à la préparation de la messe dominicale.

Affirmation : Nathalie prend part à l'organisation de cérémonies religieuses.

Réponse : VRAI

Histoire : Sylvie a vraiment hâte de retrouver ses amis. Ils doivent acheter les billets et l'attendre à l'entrée. Dans l'autobus, elle essaye de se calmer. Ce sera la première fois qu'elle fera l'expérience d'une montagne russe.

Affirmation : Les amis de Sylvie vont l'attendre près de la montagne russe.

Réponse : FAUX

Histoire : René regardait à travers de grandes fenêtres les gens qui saluaient leurs proches de la main. La dernière rencontre qu'il a eu avec sa mère datait d'il y a deux ans. Lorsqu'il a vu l'avion atterrir, il a couru vers les escaliers.

Affirmation : René avait écrit à sa mère il y a deux ans.

Réponse : FAUX

Histoire : Marcelle a rendez-vous avec le médecin. Elle attend plus de deux heures. Elle pense rentrer chez elle, mais elle a besoin de soigner sa grippe. Elle se dit que c'est la dernière fois qu'elle vient chez ce médecin.

Affirmation : Marcelle pense retourner chez elle sans avoir vu le médecin.

Réponse : VRAI

Histoire : Benjamin se rend au cinéma pour voir un film sur l'Égypte. Il découvre des paysages magnifiques du désert. Benjamin est impressionné par les images qui défilent sur l'écran. Il décide qu'il partira en Égypte pour ses prochaines vacances.

Affirmation : Benjamin a loué une cassette vidéo pour découvrir l'Égypte.

Réponse : FAUX

Histoire : Colette a un ami qui fête l'inauguration de sa résidence. Elle est invitée à la pendaison de crémaillère. C'est un appartement rénové dans la vieille ville. Elle apporte du vin et, comme cadeau, un cendrier à son ami fumeur.

Affirmation : L'appartement de l'ami de Colette est dans un vieux quartier.

Réponse : VRAI

Histoire : Dominic aime beaucoup la confiture de fruits. Il va dans les bois pour ramasser des framboises. Dans un petit coin, il est chanceux d'en trouver énormément. Il remplit un grand bol de belles framboises. Il a les mains toutes rouges.

Affirmation : Dominic trouve beaucoup de belles framboises.

Réponse : VRAI

Histoire : Claude et Philippe partent pêcher la truite. Ils voudraient camper pour la nuit au bord de la rivière et manger leurs prises. Malheureusement, ils n'arrivent pas à prendre un seul poisson. Au dîner, ils n'ont que du pain.

Affirmation : Claude et Philippe sont partis acheter de la truite.

Réponse : FAUX

Histoire : Michaël est propriétaire d'une voiture verte depuis douze ans. Il l'aime bien et l'appelle Pierrette. La voiture de Michaël est très vieille et tombe en panne. Michaël est triste parce qu'il va devoir acheter une autre voiture.

Affirmation : La vieille voiture de Michaël est de couleur bleue.

Réponse : FAUX

Liste des 12 textes du bloc portant sur les macropropositions

Histoire : Les spectateurs criaient le nom de Pierre. Parmi eux, il pouvait voir ses parents l'encourager. Tous les autres participants avaient déjà exécuté leur présentation. Il devait maintenant démontrer la qualité de sa voix. Il prit le ton et commença sa présentation.

Affirmation : Pierre allait démontrer ses talents de danseur en public.

Réponse : FAUX

Histoire : Soudain, les gens ont commencé à crier dans la succursale. Un homme s'est précipité sur Madame Morrison avec un fusil. Il l'a obligée à ouvrir le coffre de sécurité pour qu'elle lui donne ensuite tout le contenu.

Affirmation : Il y a eu un vol dans une banque pleine de monde.

Réponse : VRAI

Histoire : Joanne a l'habitude d'être malade durant ses voyages, mais aujourd'hui elle se sent bien. Soudain, la plus jeune de ses filles tombe. Heureusement, un autre touriste la ramène à bord en la tirant par son gilet de sauvetage.

Affirmation : Joanne et sa fille sont des touristes en croisière sur un bateau.

Réponse : VRAI

Histoire : Comme d'habitude, Max place les pantoufles et le journal de M. Dupont près de sa chaise. Il va à la fenêtre pour souhaiter de manière chaleureuse la bienvenue à son propriétaire. M. Dupont lui rapporte toujours des biscuits de l'épicerie.

Affirmation : Max, le fils de Monsieur Dupont, adore les biscuits de l'épicerie.

Réponse : FAUX

Histoire : Valérie et Paolo ont couru pour prendre place dans la première rangée. Leurs camarades de classe leur ont dit que c'était une histoire fantastique. Ils ont acheté du popcorn, quelques bonbons et ont attendu que les lumières s'éteignent.

Affirmation : Valérie et Paolo forment un couple marié allant au cinéma.

Réponse : FAUX

Histoire : Nancy travaille, depuis plusieurs années déjà, dans une usine de bonbons. Sa tâche est de plier des cartons. Elle s'ennuie à effectuer toujours les mêmes gestes. Cependant, elle a absolument besoin de cet argent pour joindre les deux bouts.

Affirmation : Nancy trouve que son travail est peu intéressant.

Réponse : VRAI

Histoire : Patrick vit dans un village de montagne. Il y a beaucoup de neige et le poids de la neige augmente la tension sur les fils électriques. Soudain, Patrick entend un bruit et il fait noir. Il ne peut plus lire son livre.

Affirmation : Une grosse avalanche a provoqué une panne d'électricité chez Patrick.

Réponse : FAUX

Histoire : Le hobby de Baptiste est la planche à voile. Il habite loin de la mer, mais il s'y rend tous les mois pour pratiquer sa passion. Aujourd'hui, la mer est déchaînée. Baptiste décide de rester sur la plage pour contempler l'immensité de la mer.

Affirmation : Baptiste est très prudent quand la mer est mauvaise.

Réponse : VRAI

Histoire : Isabelle souhaite vraiment devenir infirmière. Elle entre à l'université pour commencer le programme. La première fois qu'elle voit du sang, elle fait un malaise dans son cours d'anatomie. Elle se rend compte qu'elle a fait un mauvais choix.

Affirmation : Isabelle pense renoncer à la carrière d'infirmière.

Réponse : VRAI

Histoire : À Noël, Valérie a acheté un cadeau pour sa sœur Maud. Valérie le met sous l'arbre de Noël. Maud ouvre son cadeau: c'est un beau maillot de bain vert. Elle va immédiatement dans sa chambre l'essayer.

Affirmation : Maud se change immédiatement pour aller à la plage.

Réponse : FAUX

Histoire : L'ami de Laure vit dans une ville d'Italie. Laure n'a qu'un téléphone portable et ça lui coûte trop cher pour appeler son ami. Elle doit appeler d'une cabine téléphonique près de chez elle avec une carte téléphonique.

Affirmation : Le téléphone portable de Laure ne fonctionne plus.

Réponse : FAUX

Histoire : Bertrand se balade en ville l'après-midi. Il rencontre par hasard un vieil ami. Ils décident de prendre une journée de congé et vont dans un bar pour discuter autour d'une bière. Ils se racontent leurs vies pendant des heures.

Affirmation : Bertrand et son ami ont beaucoup de choses à se raconter.

Réponse : VRAI

Liste des 12 textes du bloc portant sur le modèle de situation

Histoire : Anne est en retard à son travail aujourd'hui. Elle prend sa bicyclette très rapidement et oublie ses lunettes. La rue est déjà éclairée. Soudain, elle percute un arbre et tombe de sa bicyclette. Elle retourne chez elle récupérer ses lunettes.

Affirmation : La mauvaise vue d'Anne lui a causé un accident.

Réponse : VRAI

Histoire : Mathieu et Nina attendent un enfant. Mathieu a l'habitude de fumer la pipe plusieurs fois par jour depuis plusieurs années. Il a décidé d'arrêter de fumer la pipe pour la santé de son bébé. Mathieu est souvent irritable rapidement.

Affirmation : Mathieu est très énervé par l'arrivée du bébé.

Réponse : FAUX

Histoire : Cathie travaille dans un laboratoire au centre-ville. Elle fait des expériences sur des rats pour tester des nouveaux médicaments contre la grippe. Pour cette recherche, elle doit leur faire une piqûre. Ce matin, un rat agité l'a mordue au doigt.

Affirmation : Cathie est vétérinaire spécialisée dans des médicaments.

Réponse : FAUX

Histoire : Simon et Caroline campent dans la forêt pour la nuit. Un panneau de signalisation indique qu'il y a des ours noirs. Ils décident d'installer leur tente près du lac. Dans la soirée, ils regrettent de ne pas avoir prêté attention au panneau.

Affirmation : Dans la soirée Simon et Caroline ont un problème avec des ours noirs.

Réponse : VRAI

Histoire : Stéphane joue du violon, il aime la musique classique. Une amie l'invite à une fête qu'elle donne chez elle. Toute la nuit, ils écoutent les Beatles et d'autres groupes de rock. Il décide de quitter la fête un peu plus tôt.

Affirmation : Stéphane quitte la fête tôt en raison de ses goûts musicaux.

Réponse : VRAI

Histoire : Marc aime regarder la télévision chaque soir. Son émission préférée est un divertissement musical. Or ce soir, il y a une grève à la télévision dans sa province. Marc est obligé d'écouter de la musique à la radio pour les prochains jours.

Affirmation : Marc devra attendre le réparateur pour la télévision.

Réponse : FAUX

Histoire : Dre Giroux se rend à une conférence. Au retour, elle prend un taxi pour rentrer chez elle. Elle oublie son ordinateur dans le taxi. Elle consulte la carte professionnelle du conducteur de taxi quand elle constate qu'il est revenu.

Affirmation : Le chauffeur est revenu pour rapporter l'ordinateur au Dre. Giroux.

Réponse : VRAI

Histoire : Laurent veut devenir conducteur d'autobus. Il suit des cours de conduite afin de concrétiser son plus grand rêve. Lors de la première leçon, il heurte un homme à bicyclette. Il décide de ne plus jamais prendre le volant de sa vie.

Affirmation : Laurent décide de faire face à sa mauvaise expérience.

Réponse : FAUX

Histoire : Michel décide d'acheter un cadeau à l'enfant de son collègue. Il va au magasin de jouets et achète une voiture verte. Il rend visite à son collègue dans la soirée. Quand il voit l'enfant, il constate que l'enfant est une fille.

Affirmation : Michel a choisi un cadeau approprié pour le petit enfant.

Réponse : FAUX

Histoire : Anne a déménagé dans une grande ville il y a deux mois. Elle a été chez un coiffeur. Il lui a teint les cheveux en rouge et lui a donné un nouveau style. Chez elle, Anne a pleuré devant son miroir quand elle a vu son apparence.

Affirmation : Anne préfère définitivement une coiffure plus traditionnelle.

Réponse : VRAI

Histoire : Patrick adore la nature, il a donc acheté un appareil photographique. Il est allé à la campagne pour prendre des photographies de paysage. Il a envoyé la plus belle à un concours de photographie. Quelques jours plus tard, il apprend qu'il a gagné le concours.

Affirmation : Le grand amour de Patrick pour la nature lui a fait gagner un prix.

Réponse : VRAI

Histoire : Marie ne parle pas couramment le français. Elle a lu une offre d'emploi de réceptionniste dans un hôtel de Montréal. Elle va à l'entrevue mais sa candidature n'est pas retenue. Marie décide de prendre des cours de français.

Affirmation : Marie étudiera le français parce qu'elle adore cette langue.

Réponse : FAUX

