

**Université du Québec en Outaouais**

**Validation d'un programme d'entraînement de la Mémoire de Travail dans un  
environnement virtuel : une étude pilote**

Essai doctoral présenté au  
département de psychoéducation et de psychologie

Comme exigence partielle du doctorat en psychologie, Profil neuropsychologie clinique (D.Psy.)

Par  
© Jenel BRÛLÉ

Décembre 2020

Composition du jury

**Validation d'un programme d'entraînement de la Mémoire de Travail dans un environnement virtuel : une étude pilote**

Par Jenel Brûlé

Cet essai doctoral a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Stéphane Bouchard, Ph. D., directeur de recherche, département de psychologie et de psychoéducation, Université du Québec en Outaouais.

Michel Dugas, Ph. D., président du jury, département de psychologie et de psychoéducation, Université du Québec en Outaouais.

Caroline Blais, Ph. D., examinatrice interne, département de psychologie et de psychoéducation, Université du Québec en Outaouais.

Miriam Beauchamp, Ph. D, examinatrice externe, département de psychologie, Université de Montréal.

## Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon projet et qui m'ont aidée lors de la rédaction de cet essai doctoral.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de recherche Stéphane Bouchard, titulaire de la Chaire de recherche du Canada en cyberpsychologie clinique et professeur au Département de psychoéducation et de psychologie à l'Université du Québec en Outaouais, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Marie-Christine Rivard qui a réalisé la programmation de mon programme de remédiation, et ce toujours avec un sourire malgré les plusieurs changements au cours de la conception de cette dernière.

Catherine Brisebois qui a enregistré plusieurs messages (incluant chanter bonne fête) pour mon programme et qui était là pour répondre à mes questions quand nécessaire.

Michael Massicotte qui m'a aidé avec la conception des projets d'affaires et tous mes collègues qui sont devenus des comédiens de doublage pour faire de mon programme une réalité.

Ma mère, ma sœur et mon frère, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

## RÉSUMÉ

**Introduction :** La mémoire de travail (MDT) est une fonction cognitive essentielle; elle permet aux êtres humains d'interagir avec le monde en maintenant l'information nécessaire pour les tâches complexes de la vie quotidienne. La MDT peut être affectée dans plusieurs conditions neurologiques, notamment dans le cas de lésions cérébrales acquises, comme suite à un traumatisme craniocérébral (TCC) ou accident vasculaire cérébral (AVC). Cependant, de nombreuses études suggèrent qu'il est possible de remédier aux troubles de la MDT à l'aide de programmes de remédiation de la MDT. La plupart des programmes de remédiation se limitent à utiliser une augmentation du nombre d'items à retenir pour augmenter la difficulté de la tâche. Par contre, les recherches menées sur la MDT suggèrent d'autres possibilités intéressantes à explorer et à combiner.

**Objectif :** Dans cette perspective, ce projet a pour objectif de valider l'impact de quatre facteurs de complexité sur la difficulté d'une tâche de MDT utilisé dans un programme d'entraînement de la MDT en réalité virtuelle (Virtual Reality Working Memory training program, VR-WORK-M). Pour permettre d'entraîner la MDT, le programme propose plusieurs étapes qui résultent de la combinaison de ces quatre facteurs : (a) Type d'item à retenir ; (b) Nombre d'items à retenir ; (c) Nombre de sous-tâches à réaliser lors de la rétention de l'information ; et (d) Nombre de distracteurs intervenants durant la rétention de l'information.

**Méthode :** Quatorze participants adultes, âgés de 22 à 32 ans, en bonne santé ont participé à cette étude pilote de validation. La participation impliquait une rencontre où les sujets complétaient chacune des 54 étapes du projet en ordre aléatoire.

**Résultats :** Les analyses de variance à mesures répétées montrent que les quatre facteurs de complexité décrits plus hauts ont un impact sur la difficulté de la tâche de MDT, tel que mesurée par les taux de réussite obtenus dans un échantillon non-clinique.

**Conclusion :** Les quatre facteurs de complexité sont des aspects qui peuvent être manipulés pour pouvoir créer un programme d'entraînement de la MDT avec une augmentation graduelle de la difficulté. Reste qu'il y a encore des études à réaliser auprès d'une population clinique avant de finaliser la structure optimale du programme VR-WORK-M.

*Mots-clés:* mémoire de travail, entraînement cognitif, réalité virtuelle, réhabilitation, remédiation, revalidation

## ABSTRACT

**Introduction:** Working memory is an essential cognitive function, as it allows humans to interact with the world, by maintaining the necessary information for completing complex daily life tasks. Working memory can be affected by several neurological conditions, including acquired cerebral lesions, such as might be the result following an acquired brain injury or a stroke. However, many studies suggest that it is possible to improve working memory deficits with working memory training programs. Most working memory training programs only increase the difficulty of the task by increasing the number of items to retain. However, the research on working memory offers interesting new possibilities to explore and combine.

**Objective:** As such, the objective of this project is to validate the impact of four complexity factors on a working memory task used in a working memory training program in virtual reality (Virtual Reality Working Memory training program, VR-WORK-M). In order to train working memory, the program offers several levels which are the result of the combination of four factors: (a) Type of item to remember; (b) Number of items to remember; (c) Number of subtasks to be completed during the retention of the information; and (d) Number of distractors occurring during the retention of the information.

**Methodology:** Fourteen healthy subjects, aged between 22 and 32, participated in this pilot study. The participants were met for one session where they completed the 54 levels of the program in random order.

**Results:** The repeated measures analyses of variance show that the four complexity factors described above do indeed have an impact on the difficulty of the working memory task, as measured by the success rate in a non-clinical sample.

**Conclusion:** The four complexity factors are intriguing conditions which can be manipulated to create a working memory training program with a gradual increase in difficulty. However, there are still studies that need to be done with clinical populations in order to finalize the structure of VR-WORK-M program.

*Keywords:* working memory, cognitive training, virtual reality, rehabilitation, remediation, revalidation,

## TABLE DES MATIERES

<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>vii</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES</b> .....	<b>ix</b>
<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION ET CONTEXTE THÉORIQUE</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Bases théoriques de la MDT</b> .....	<b>3</b>
1.1 Le modèle de la MDT de Baddeley .....	3
1.2 D'autres modèles de la MDT .....	12
<b>2 Bases neuronales de la MDT</b> .....	<b>15</b>
<b>3 L'entraînement et la remédiation de la MDT</b> .....	<b>17</b>
3.1 Les paradigmes d'entraînement de la MDT .....	18
3.2 Les paradigmes de Brown-Peterson et d'empan complexe pour évaluer et entraîner la MDT 20	
3.3 Augmentation de la difficulté d'une tâche de MDT .....	22
3.4 Entraînement des fonctions cognitives à l'aide de la réalité virtuelle .....	23
<b>4 Objectifs et hypothèses de l'essai doctoral</b> .....	<b>25</b>
<b>CHAPITRE 2 : MÉTHODE</b> .....	<b>28</b>
<b>Participants</b> .....	<b>28</b>
<b>Appareillage et outils de mesure</b> .....	<b>29</b>
<b>Programme de remédiation de la MDT: (VR-WORK-M)</b> .....	<b>30</b>
<b>La tâche de MDT du VR-WORK-M : Retenir et présenter les items du projet d'affaires</b> .....	<b>34</b>
<b>Augmentation de la difficulté de la tâche de MDT</b> .....	<b>34</b>
<b>Procédure</b> .....	<b>40</b>
<b>Définition de succès</b> .....	<b>41</b>
<i>Mesure de taux de réussite (variable dépendante)</i> .....	41
<b>CHAPITRE 4 : DISCUSSION</b> .....	<b>50</b>
<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>59</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>68</b>
<b>Annexe A : Questionnaire de renseignements généraux</b> .....	<b>69</b>
<b>Annexe B : Certificat d'approbation de l'éthique</b> .....	<b>71</b>
<b>Annexe C : Formulaire de consentement</b> .....	<b>72</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. <i>Données sociodémographiques des participants</i> .....	28
Tableau 2. <i>Présentation des dix-huit thèmes du projet d'affaires</i> .....	31
Tableau 3. <i>Présentation de la structure du programme, des thèmes et des quatre facteurs de complexité imbriqués dans les 54 étapes</i> .....	35
Tableau 4. <i>Les six façons dont les étapes se déroulent</i> .....	38
Tableau 5. <i>Moyennes (et écarts-types) des taux de réussite pour les quatre facteurs de complexité du VR-WORK-M et leurs niveaux respectifs (N=14)</i> .....	43
Tableau 6. <i>Taux de réussites (% sur 14 participants) à chacune de 54 étapes du VR-WORK-M</i>	47

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. <i>Le modèle révisé à Composantes Multiples de la mémoire de travail de Baddeley (2003)</i> .....	4
Figure 2. <i>Modèle de la boucle phonologique de Baddeley (2002)</i> .....	11
Figure 3. <i>Modèle de Processus Emboîtés de Cowan (1999)</i> .....	14
Figure 4. <i>Illustration de l'activation du réseau du réseau bilatéral fronto-pariétal (Rottschy et al., 2012)</i> .....	17
Figure 5. <i>Représentation schématique des paradigmes d'évaluation de la MDT</i> .....	22
Figure 6. <i>Capture d'écran de l'environnement virtuel illustrant le point de vue du participant avant de débiter la présentation de son projet d'affaires dans le VR-WORK-M</i> .....	29
Figure 7. <i>Capture d'écran de l'expérimentateur illustrant un distracteur (une personne qui tombe en marchant entre les tables, au centre de l'image) et (en bleu, en haut et en bas de l'image) le niveau actuel et les réponses attendues du participant</i> .....	37
Figure 8. <i>Représentation visuelle des comparaisons statistiquement significatives entre les taux de réussite moyens pour les quatre facteurs de complexité du VR-WORK-M</i> .....	46
Figure 9. <i>Taux de réussite à chacune des 54 étapes du VR-WORK-M, selon l'ordre numérique des étapes (N=14)</i> .....	48
Figure 10. <i>Illustration des 54 étapes du VR-WORK-M en ordre décroissant de taux de réussite (N=14)</i> .....	49

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

MDT	Mémoire de Travail
MLT	Mémoire à Long Terme
MCT	Mémoire à Court-Terme
SAS	Système Attentionnel Superviseur
IRMf	Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnel
CC	Corps Calleux
TCC	Traumatisme Craniocérébral
TCClg	Traumatisme Craniocérébral léger
ACV	Accident Cérébrovasculaire
RV	Réalité Virtuelle
VR-WORK-M	Virtual Reality Working Memory Training Program

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION ET CONTEXTE THÉORIQUE

Dans le but de développer un programme d'entraînement de la MDT, qui pourrait éventuellement servir comme programme de remédiation chez une population clinique, nous avons effectué des recherches exhaustives sur la MDT pour voir quelles stratégies seraient utiles dans un programme de remédiation. Les prochaines sections présentent les bases théoriques de la MDT qui ont permis de cerner les quatre facteurs de complexité utilisés pour augmenter la difficulté de la tâche de MDT. Ensuite, nous détaillons le réseau neuronal sous-tendant la MDT. Finalement, nous explorons les méthodes existantes d'entraînement de la MDT, ainsi que leurs limites et le rôle émergent de la réalité virtuelle dans l'entraînement et la remédiation cognitive. Cette base théorique mène à la présentation d'un nouvel outil d'entraînement cognitif et de l'étude pilote de validation de ce dernier.

La mémoire de travail (MDT) est cruciale dans notre quotidien. Elle joue un rôle majeur dans la plupart des activités cognitives de haut niveau et régule nos interactions conscientes avec le monde (Ricker, AuBuchon, & Cowan, 2010). Miller, Galanter et Pribram (1960; Mora, 2011) ont initialement introduit le terme pour décrire le maintien d'informations nécessaires pour accomplir nos buts, ce qui décrirait plutôt la mémoire prospective maintenant (Miller et al., 1960). Au cours des années, la définition de la MDT a évolué, entraînant la présence de plusieurs définitions avec des différences subtiles qui peuvent influencer les chercheurs selon la conception qui les guide. Cela peut prêter à confusion, car les chercheurs décrivent rarement la définition utilisée dans leurs communications (Cowan, 2017). Une des premières définitions, issues de l'informatique, suggère que la MDT est tout simplement une place pour détenir l'information à utilisation temporaire (Cowan, 2017). Les chercheurs en psychologie animale utilisent également le terme MDT pour décrire une partie du cerveau utilisée pour garder une trace d'actions et conséquences récentes,

pour ainsi permettre aux séquences de comportements de rester efficaces à travers le temps (Cowan, 2017). Une autre définition distingue les idées de stockage et de traitement; elle suggère que la MDT combine le stockage temporaire d'information et les processus qui agissent là-dessus (Cowan, 2017). Une définition plus de base propose que la MDT soit simplement l'ensemble des composantes du cerveau qui garde temporairement de l'information dans un état de disponibilité accrue pour être traitée ; ainsi, la MDT n'inclut pas les processus qui pourraient agir sur cette information (Cowan, 2017). D'autres chercheurs proposent que la MDT fasse partie de la mémoire à long terme (MLT) et réfère aux signaux établis lors d'activités en cours qui nous permettent de déplacer notre attention de cette activité pour y revenir après un délai (Cowan, 2017). D'autres chercheurs utilisent le terme MDT pour référer tout simplement à l'utilisation de l'attention pour préserver l'information pour les processus en cours et inhiber les distractions, processus qui travaille en conjonction avec les mécanismes de stockage temporaire (Cowan, 2017). Selon d'autres auteurs, la MDT peut même inclure le processus de récupération de la MLT (Cowan, 2017). Il faut ajouter à cela le fait que certains chercheurs utilisent les termes MDT et mémoire à court terme (MCT) de façon interchangeable, alors que d'autres les différencient (Baddeley, 2012 ; Rottschy et al, 2012) ; la MDT permettrait de maintenir et manipuler l'information, alors que la MCT s'occuperait du stockage temporaire de l'information en mémoire (Diamond, 2013). Malgré ces divergences, une définition introduite assez tôt par Baddeley et Hitch, mais avec plusieurs élaborations subséquentes, est devenue un des modèles théoriques dominants de la MDT. Cette définition suggère que la MDT est un système de capacité limitée à plusieurs composantes, qui maintient l'information temporairement, et contrôle son utilisation dans les différents processus cognitifs (Baddeley, 2000).

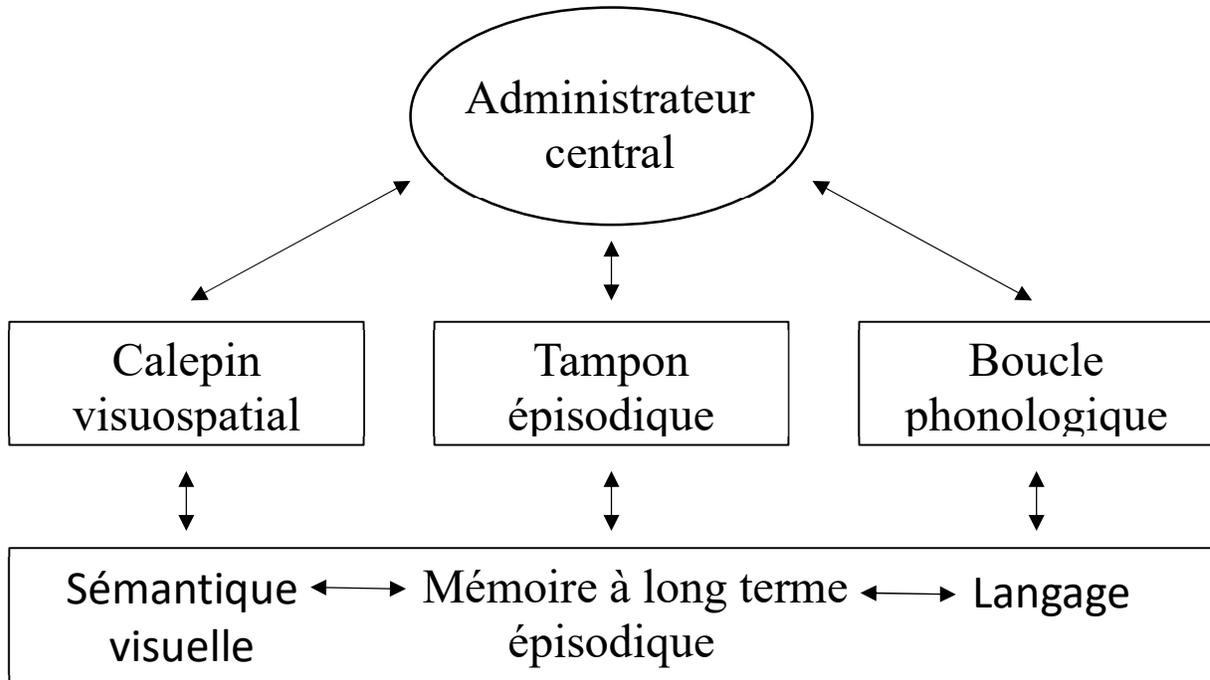
## 1 Bases théoriques de la MDT

### 1.1 Le modèle de la MDT de Baddeley

Dans le modèle courant de Baddeley, la MDT se compose de quatre éléments : (1) le système de capacité attentionnelle limitée (administrateur central) avec deux systèmes de stockage auxiliaires; (2) la boucle phonologique; le (3) calepin visuospatial ainsi que (4) le tampon épisodique, composante qui a été rajoutée plus tard (Baddeley, 2003). L'administrateur central constitue le composant maître du système qui a un rôle dans l'allocation de l'attention pour pouvoir coordonner et contrôler les systèmes auxiliaires (Baddeley, 2003). De plus, il concentre l'attention, divise l'attention, alterne entre les tâches et communique avec la MLT (Baddeley, 2012). La boucle phonologique comprend un *stock phonologique* qui peut garder des traces mnésiques pendant quelques secondes et un processus de *répétition subvocale* qui permet de garder les traces plus longtemps (Baddeley, 2003). Le calepin visuospatial stocke l'information visuelle et spatiale. Dans ce sous-système, on peut aussi distinguer l'information associée à l'objet (quoi) et l'information spatiotemporelle (où ; Baddeley, 2003). Finalement, le tampon épisodique intègre l'information de diverses sources en « épisodes », comme la mémoire épisodique, mais de façon plus temporaire. L'administrateur central contrôle ce composant et peut récupérer l'information prise en charge par le tampon épisodique afin de la manipuler et la modifier (Baddeley, 2000). Le tampon épisodique joue un rôle très important dans l'interaction entre la MDT et la MLT, en assurant l'encodage et la récupération de l'information (Baddeley, 2003).

**Figure 1**

*Le modèle révisé à Composantes Multiples de la mémoire de travail de Baddeley (2003)*



*Note : Traduction libre par Jenel Brûlé*

### *1.1.1 L'administrateur central du modèle de Baddeley*

Conçu à l'origine comme un fourre-tout pour les processus généraux non pris en charge par les sous-systèmes, Baddeley (2002) a déjà décrit l'administrateur central comme un petit homoncule qui prend les décisions sur l'utilisation des sous-systèmes. Bien que ce point de vue soit souvent critiqué, Baddeley utilise cette métaphore, non pas pour fournir une explication sur le fonctionnement de l'administrateur central, mais plutôt pour représenter les parties du modèle qui ne sont pas encore entièrement élucidées (Baddeley, 2002 ; Baddeley, 2012). Au départ, Baddeley a décidé de se concentrer sur les propriétés de contrôle attentionnel de cette composante en empruntant le modèle du système attentionnel superviseur (SAS) de Norman et Shallice (1986) (Baddeley, 2002). Ce modèle décrit deux façons dont les actions sont contrôlées. Premièrement,

des habitudes profondément inculquées (schémas) et demandant peu d'attention peuvent guider implicitement les actions par les indices environnementaux (p.ex., conduire au travail). Lors de situations non gérées par les habitudes (p. ex., fermeture d'une route sur le trajet normal au travail), un régulateur limité, le SAS, combine l'information de la MLT avec les stimuli actuels pour trouver de nouvelles solutions. L'administrateur central correspond au SAS (Baddeley, 2002 ; Baddeley, 2003 ; Baddeley, 2012). La partie majeure de la recherche sur l'administrateur central a utilisé un paradigme de tâches concurrentes pour perturber les différentes composantes de la MDT. Ceci a entraîné la proposition de quatre fonctions de l'administrateur central. Premièrement, il serait impliqué dans la concentration de l'attention, puisque les tâches concurrentes qui demandent beaucoup d'attention vont perturber la performance à des tâches complexes. Ensuite, l'administrateur central serait nécessaire pour diviser l'attention et pour alterner l'attention entre deux tâches, bien que d'autres fonctions cognitives puissent être impliquées dans l'alternance. Finalement, il aurait également la capacité à interagir avec la MLT (Baddeley, 2003 ; Baddeley, 2012 ; Baddeley et al., 2010).

### *1.1.2 Le tampon épisodique du modèle de Baddeley*

Alors qu'au départ, l'administrateur central était considéré comme un système purement attentionnel sans capacité de stockage, cette conception ne pouvait pas expliquer certains phénomènes associés à la MDT (Baddeley, 2012 ; Baddeley et al., 2010). Par exemple, des études ont montré que, lorsque possible, les codes visuels et phonologiques peuvent être combinés pour optimiser la performance (Baddeley, 2012 ; Baddeley et al., 2010). De plus, le traitement du langage montre qu'une seule phrase peut être influencée par un code phonologique lors de délais plus courts et un code sémantique à des intervalles plus longs (Baddeley, 2012 ; Baddeley et al., 2010). En outre, l'empan mnésique pour des mots non reliés est d'environ 5 mots, mais augmente

à 15 mots quand les mots font partie d'une phrase, suggérant une interaction entre les systèmes phonologiques et sémantiques (Baddeley, 2012 ; Baddeley et al., 2010). La corrélation entre l'empan de la MDT et les processus cognitifs plus complexes pose un autre problème pour l'idée d'un administrateur central purement attentionnel. Cette corrélation ne pourrait pas s'expliquer par un système sans potentiel pour stockage mis à part les capacités limitées de la boucle phonologique et le calepin visuospatial (Baddeley, 2012 ; Baddeley et al., 2010). Ces évidences, parmi d'autres, ont soulevé deux questions importantes : 1) comment les composantes diverses de la MDT, qui utilisent des codes différents, peuvent-elles être intégrées? et 2) quelle est la relation entre la MDT et la MLT ? Pour répondre à ces questions, les chercheurs ont rajouté le tampon épisodique au modèle (Baddeley, 2012 ; Baddeley et al., 2010). Les auteurs décrivent cette composante comme une réserve temporaire à capacité limitée qui fournit une interface entre plusieurs systèmes ayant des codes mnésiques différents. Ceci est possible en raison de son système de codage multidimensionnel. Il est appelé épisodique, puisqu'il maintient des « épisodes » (appelée « chunks » d'informations intégrées) qui deviennent par la suite accessibles à la conscience (Baddeley et al., 2010). Selon Baddeley, la capacité de maintien de ce système est limitée à quatre épisodes (Baddeley, 2012).

### *1.1.3 La boucle phonologique du modèle de Baddeley*

Baddeley décrit la boucle phonologique comme un système à éléments se composant d'une réserve temporaire (*stock phonologique*) et un système pour le maintien d'information par *répétition subvocale* (Baddeley, 2003). Classiquement, la boucle phonologique a été considérée comme une réserve pour l'information verbale auditive, mais elle semble également responsable pour les informations verbales présentées visuellement, lues sur les lèvres et dites en langue des signes (Baddeley, 2012). Lorsque les informations verbales sont présentées visuellement, le

processus de répétition subvocale les recode d'un code orthographique à un code phonologique (Baddeley, 2003 ; Neath, 2000). Selon ce modèle, l'information dans le stock phonologique va se dégrader après deux secondes, mais peut se rafraîchir en la récupérant et la réarticulant par la répétition subvocale (Baddeley, 2003). Plusieurs études ont tenté de décider si le processus de dégradation, dans l'absence de la répétition subvocale, est dû au déclin des traces mémorielles ou à l'interférence (Baddeley, 2012 ; Neath & Brown, 2012). Baddeley, quant à lui, a choisi de supposer qu'un processus de déclin cause la dégradation des traces mémorielles. Par contre, il admet également qu'un processus d'interférence doit se produire dans une certaine mesure pour expliquer la capacité limitée du stock phonologique, soit par déplacement ou écrasement (Baddeley, 2012). Lorsque la répétition subvocale est possible, l'empan de ce sous-système est limité puisque le processus d'articulation se passe en temps réel ; quand le nombre d'items à répéter augmente, le premier item s'estompe avant d'être répété (Baddeley, 2003).

Différents phénomènes existent qui aident à mieux comprendre la nature de la boucle phonologique. Premièrement, l'effet de similarité phonologique suggère que l'information dans le stock phonologique est conservée sous forme de phonèmes (Baddeley, 2012). Cet attribut décrit l'effet nuisible de la similarité phonologique (c.-à-d. similarité acoustique des stimuli ; p. ex., b, d, c, p, v ou man, cat, map, can) à l'intérieur d'une même séquence sur le rappel immédiat. Cette similarité entraînerait des confusions à l'intérieur du stock phonologique, ce qui peut nuire au rappel de ces items. Cet effet ne se retrouve pas pour des stimuli avec une similarité sémantique (p. ex., huge, large, big, long, tall) (Baddeley et al., 2018).

Ensuite, l'effet d'écoute inattentive décrit le phénomène où un discours non pertinent va interférer avec le rappel de séquences de chiffres présentés visuellement, et ce, même si les participants sont avertis d'ignorer les paroles. Cet effet se retrouve même si le discours se compose

de mots incohérents, de syllabes absurdes ou d'une langue inconnue, présentés durant ou après les stimuli à apprendre. En effet, Baddeley a trouvé que des chiffres sans lien entre eux ne donnent pas plus d'effet que les mots absurdes se composant des mêmes syllabes (p. ex., one, two vs. tun woo), suggérant que le processus d'interférence se produit à un niveau pré-lexique. Lorsqu'une étude a montré que les mots monosyllabiques perturbent la rétention de chiffres monosyllabiques plus que les mots bisyllabiques, Baddeley a conclu que le phénomène d'écoute inattentive était dû à la similarité phonologique (Baddeley, 2012), ce qui cause une interférence dans le stock phonologique (Neath, 2000). Quand des études ultérieures ont révélé que la similarité phonologique n'avait pas d'impact sur le phénomène d'écoute inattentive, il a retiré cette supposition, mais, malgré cela, cette hypothèse est devenue une partie centrale du modèle de MDT (Baddeley, 2012). D'autres études ont montré que plusieurs autres sons, tels que les tons fluctuants, peuvent perturber la MCT. Ceci a entraîné le développement de l'hypothèse de l'état changeant (changing state hypothesis), qui suggère que les sons doivent fluctuer pour provoquer l'effet d'écoute inattentive. Ceci fait partie d'un modèle de la MDT plus large, « Object-Oriented Episodic Record (OOE-R) » (Baddeley, 2012). L'hypothèse OOE-R suppose que des représentations abstraites d'items ou d'événements (des « objets ») sont intégrées en mémoire sous forme de trajectoires épisodiques qui suivent les mêmes principes que l'organisation perceptuelle. Les « objets » faisant partie d'une trajectoire épisodique sont liés par des associations par deux qui contiennent les informations sur l'ordre d'occurrence. Puisque ces associations sont rapidement dégradées, un mécanisme de répétition sert à rafraîchir cette information. Ainsi, l'interférence peut s'expliquer par l'interruption du processus de répétition par d'autres séquences d'événements contenant des indices sur l'ordre temporel. Cet argument suggère que les indices d'ordres

concurrents perturbent les associations entre les pairs d'objets, ce qui peut causer la détérioration du rappel en série (Meiser & Klauer, 1999).

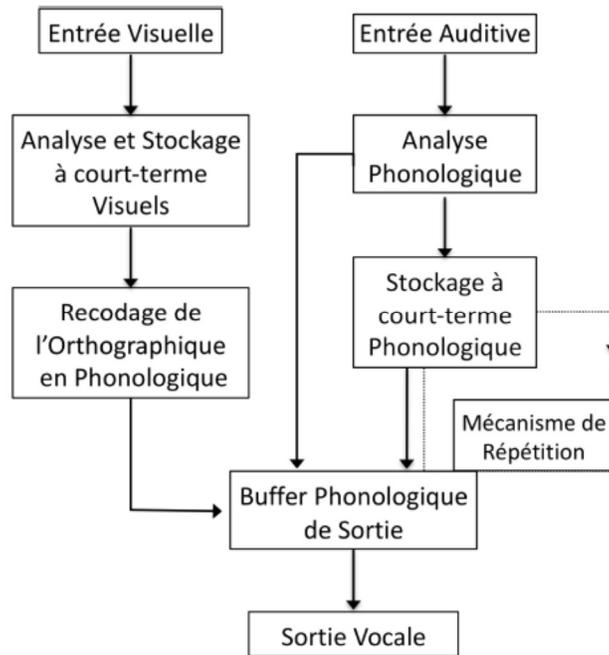
Un autre phénomène, l'effet de longueur de mots, est considéré comme un argument en faveur de la présence d'un processus de répétition subvocale qui fonctionne en temps réel et qui sert à maintenir l'information en MDT. Cet effet suggère que le rappel est meilleur pour les mots avec une durée de prononciation plus courte, et ce, quel que soit le nombre de syllabes. Ainsi, les mots plus longs prennent plus de temps pour être répétés, entraînant plus de détérioration des traces et un rappel plus pauvre (Baddeley, 2012). Or, certains auteurs n'acceptent pas cette hypothèse. Ils considèrent que l'effet de longueur de mots survient lors du rappel et non lors de la répétition subvocale (Mora, 2011). Ils proposent que la sensibilité à l'interférence de sortie s'explique par le fait que les mots plus longs prennent plus de temps pour être articulés. Certaines études faites pour résoudre cette question suggèrent que l'effet de longueur de mots est, en fait, influencé par ces deux facteurs, la répétition subvocale et l'articulation lors du rappel (Baddeley et al, 2002). D'autres explications ont été avancées, telles que la taille du voisinage lexical, la spécificité des stimuli, les erreurs de reconstruction, etc. (Guitard et al., 2018).

Finalement, l'effet de suppression articulatoire décrit le phénomène où la performance décline lors de l'élimination de la répétition subvocale (p. ex., en obligeant les participants à répéter le mot « the »), puisque les items à maintenir ne sont plus rafraîchis et deviennent vulnérables au processus de déclin temporel (Baddeley, 2012). L'effet de suppression articulatoire peut également avoir un impact sur les autres effets décrits précédemment. Premièrement, il va éliminer l'effet de similarité phonologique et l'effet d'écoute inattentive pour le matériel présenté visuellement, mais pas auditivement. Ceci peut s'expliquer par le fait que la suppression articulatoire interfère avec le recodage de l'information visuelle par le processus de répétition subvocale, alors que

l'information auditive y a un accès obligatoire (Baddeley, 2012 ; Hanley & Bakopoulou, 2003). Ainsi, l'information visuelle ne peut pas atteindre le stock phonologique et n'est donc pas sujette aux effets de similarité phonologique et d'écoute inattentive, puisqu'elle serait maintenue quelque part d'autre (Baddeley, 2012 ; Hanley & Bakopoulou, 2003 ; Mora, 2011). Lorsque la suppression articulaire est introduite lors du maintien d'information auditive, on retrouve toujours les effets de similarité phonologique et de l'écoute inattentive. Selon le modèle, ceci s'explique par l'idée que le stock phonologique et la répétition subvocale sont des composantes dissociées. Ainsi, les effets de similarité phonologique et d'écoute inattentive peuvent agir sur leur propre composante (le stock phonologique) sans interférence de la part de la suppression articulaire qui, quant à elle, va agir sur la répétition subvocale (Hanley & Bakopoulou, 2003). Selon Baddeley (1975), la suppression articulaire élimine l'effet de longueur de mots, puisque les deux effets agissent sur la même composante, la répétition subvocale. Lorsque la répétition subvocale ne peut pas maintenir les mots, le système exécutif les stockent et les propriétés phonologiques n'ont plus d'impact sur leur rappel (Mora, 2011 ; Neath, 2000).

**Figure 2**

*Modèle de la boucle phonologique de Baddeley (2002)*



*Note : Adaptation par Mora (2011)*

#### *1.1.4 Le mécanisme de réintégration*

Le modèle de la boucle phonologique de Baddeley ne peut pas expliquer certains effets retrouvés dans la littérature, dont l'effet de fréquence et l'effet de lexicalité (Mora, 2011). L'effet de fréquence décrit l'impact de la fréquence de mots sur leur rappel lors de tâches de MCT et de MLT. Lors de tâches de MLT, les mots qui apparaissent fréquemment dans le langage sont mieux retenus que les mots qui apparaissent plus rarement. Wright (1979) a suggéré que l'effet de fréquence existe parce que les mots rares prennent plus de temps à dire, provoquant ainsi l'effet de longueur de mots. Par contre, l'effet de fréquence reste même lors de la suppression articulaire qui élimine l'effet de longueur de mots et même si la durée d'articulation est contrôlée (Hulme et al., 1997). L'effet de lexicalité décrit le phénomène où des mots sont mieux rappelés que des non-

mots (Turner et al., 2004). Le mécanisme de réintégration, originalement proposé par Schweickert (1993), permet d'expliquer comment la MLT peut influencer les performances à des tâches de MCT. La réintégration, comme défini par le dictionnaire Larousse, est un « processus psychologique selon lequel un élément d'une totalité mentale tendrait à faire réapparaître cette totalité dans l'esprit d'un sujet » (Larousse, 2021); ainsi le mécanisme de réintégration (traduction par Mora, 2011) dans le cadre de la MDT représente un mécanisme qui permet de reconstruire les traces mnésiques dégradées. En effet, les représentations de mots en MLT faciliteraient la récupération de traces mnésiques dégradées en MCT (Turner et al., 2004 ; Ritchie et al., 2015) et aideraient avec le processus de réintégration de ces mêmes traces (Hulme et al., 1997). Ces représentations seraient plus accessibles pour les mots fréquents que les mots rares, et les non-mots n'auraient même pas de représentations et ne pourraient pas bénéficier de la réintégration (Turner et al., 2004).

## 1.2 D'autres modèles de la MDT

Jusqu'à maintenant, l'introduction a présenté de façon détaillée de modèle de Baddeley et de ses variantes afin de guider la création d'un outil de remédiation de la MDT. Toutefois, ce modèle n'est pas le seul à avoir été proposé par les chercheurs sur la MDT. Les prochaines sections feront état d'autres modèles alternatifs afin de porter un regard critique sur le modèle de Baddeley.

### 1.2.1 *Le modèle de Processus Emboîtés*

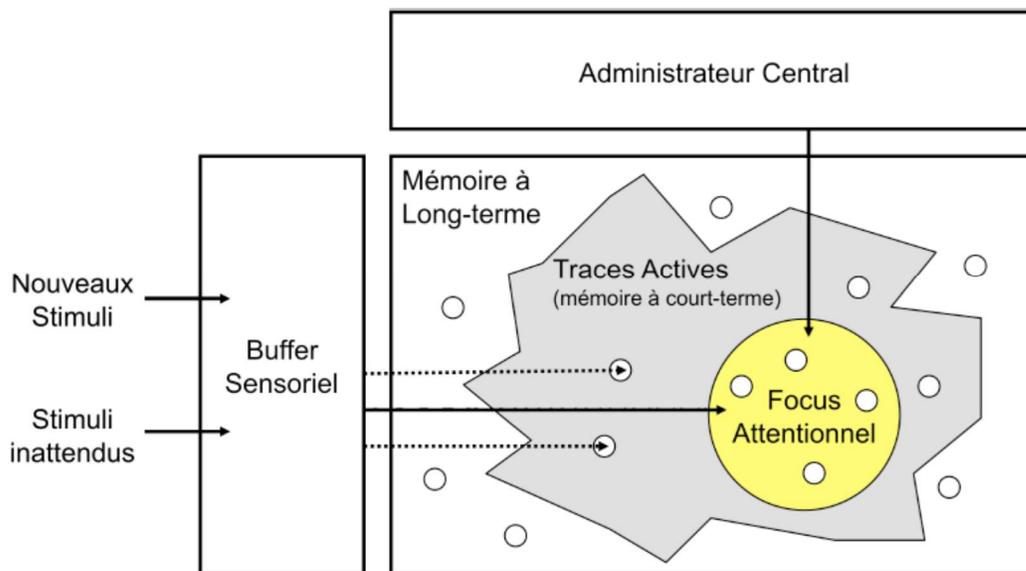
Le modèle de Processus Emboîtés de Cowan (1995) se base sur cinq principes qui mettent l'accent sur le lien entre la mémoire et l'attention. 1) L'information en MDT se compose hiérarchiquement de la MLT, le sous-ensemble d'information en MLT qui est activée et le sous-ensemble de cette information qui fait l'objet de l'attention. 2) Les limites de traitement se diffèrent selon la modalité en question. Une capacité restreinte limite la focalisation attentionnelle et le temps limite

l'activation de l'information en MLT. 3) Des processus volontaires (un administrateur central) et involontaires (système d'orientation attentionnelle) contrôlent conjointement la focalisation attentionnelle. 4) Les stimuli qui sont demeurés stables avec le temps et qui n'importent pas pour l'individu vont activer certaines caractéristiques en mémoire, mais ne vont pas attirer l'attention. 5) La prise de conscience influence le traitement ; lors de la perception, elle augmente le nombre de caractéristiques qui sont encodées. En ce qui a trait à la mémoire, la prise de conscience met à disposition les nouvelles représentations mnésiques pour le rappel explicite. À son avis, la MDT réfère aux processus cognitifs qui conservent l'information dans un état accessible, pour pouvoir effectuer n'importe quelle tâche avec une composante cérébrale. Selon le modèle de Processus Emboîtés, la MDT est composée d'un administrateur central, un tampon sensoriel et les connaissances en MLT qui sont temporairement activées (Cowan, 1999). Selon Cowan, les connaissances en MLT peuvent avoir différents niveaux d'activation. Premièrement, ils peuvent demeurer inactifs et donc inaccessibles à l'attention. Ensuite, l'information peut devenir active ou active *et* présente dans la focalisation attentionnelle (voir Figure 3). L'administrateur central peut contrôler volontairement l'activation des traces mnésiques existantes ou certaines données provenant de l'environnement grâce au mécanisme de focalisation attentionnelle (processus top-down). D'autres informations provenant de l'environnement, comme des stimuli nouveaux ou des informations importantes pour l'individu, peuvent attirer l'attention de façon involontaire (processus bottom-up). L'information active, mais qui ne fait pas objet de l'attention, va se dégrader avec le passage du temps. Elle peut être rafraîchie en passant dans la focalisation attentionnelle. La focalisation attentionnelle est limitée à 3-4 items, et ce indépendamment de la modalité des stimuli (Cowan, 1999 ; Gruszka-Gosiewska & Orzechowski, 2016). Les stimuli qui passent par le tampon sensoriel vont devenir actifs et peuvent passer par la focalisation

attentionnelle si le stimulus est nouveau/important pour l'individu ou si l'administrateur central dirige la focalisation attentionnelle vers le stimulus environnemental (Cowan, 1999). Bien que ce modèle puisse sembler très différent de celui de Baddeley, celui-ci note que les différences peuvent être attribuées à une différence d'accord d'importance et de terminologie (Baddeley, 2012).

**Figure 3**

*Modèle de Processus Emboîtés de Cowan (1999)*



*Note : Adaptation par Mora (2011)*

### 1.2.2 Le modèle de Partage Temporel des Ressources (TBRs)

Le modèle de Partage Temporel des Ressources de Barrouillet et ses collaborateurs représente un modèle de la MDT qui décrit le maintien et le rafraîchissement de l'information en fonction du temps (Puma et al., 2018). Ce modèle suppose que les deux composantes de la plupart des tâches complexes de MDT, le traitement et le stockage, nécessitent l'attention et, puisque l'attention est une ressource limitée, elle doit être partagée entre les deux. Ensuite, dès que l'attention est détournée des traces mnésiques de l'information à retenir, ces derniers souffrent

d'un déclin temporel. Le rafraîchissement de ces traces nécessite la récupération en mémoire par la refocalisation attentionnelle. De plus, le modèle suppose qu'un seul processus cognitif contrôlé peut survenir à la fois. Ainsi, un processus d'alternance rapide et fréquent entre le traitement et le stockage qui se produisent au cours d'une tâche donnée permet le partage d'attention en MDT. Par conséquent, lors d'une tâche de MDT impliquant à la fois le maintien de l'information et le traitement d'une tâche concurrente, le coût cognitif de la tâche concurrente limite l'empan d'un adulte. Toutefois, la conception du coût cognitif par Barrouillet et ses collaborateurs diffère de la conception plus traditionnelle qui suggère que le coût cognitif dépend de la complexité de la tâche concurrente. Selon le modèle TBRS, les contraintes temporelles déterminent le coût cognitif. En effet, le coût cognitif est une fonction du temps qu'une tâche donnée capte l'attention, empêchant ainsi le rafraîchissement des traces mnésiques ; c'est-à-dire plus une tâche concurrente capte l'attention, moins il y a d'opportunités de détourner l'attention vers le rafraîchissement et la récupération des traces mnésiques. Ainsi, la charge cognitive peut être modélisée sous forme de ratio entre le temps utilisé dans le traitement de la tâche concurrente et le temps total (Barrouillet & Camos, 2004 ; Barrouillet et al., 2007 ; Barrouillet et al., 2009 ; Puma et al., 2018).

Le modèle de Partage Temporel des Ressources Étendu de Camos et al. (2009) assimile le mécanisme de répétition subvocale de Baddeley, en raison de toutes les preuves à l'appui de ce dernier. Ce modèle adapté suggère que le rafraîchissement attentionnel du modèle TBRS et la répétition subvocale sont deux mécanismes indépendants qui travaillent en parallèle pour maintenir l'information verbale. Le rafraîchissement attentionnel fonctionnerait à un niveau central et représenterait un mécanisme général de maintien, tandis que la répétition subvocale serait un processus périphérique spécifique à un domaine particulier (Camos et al., 2009).

## **2 Bases neuronales de la MDT**

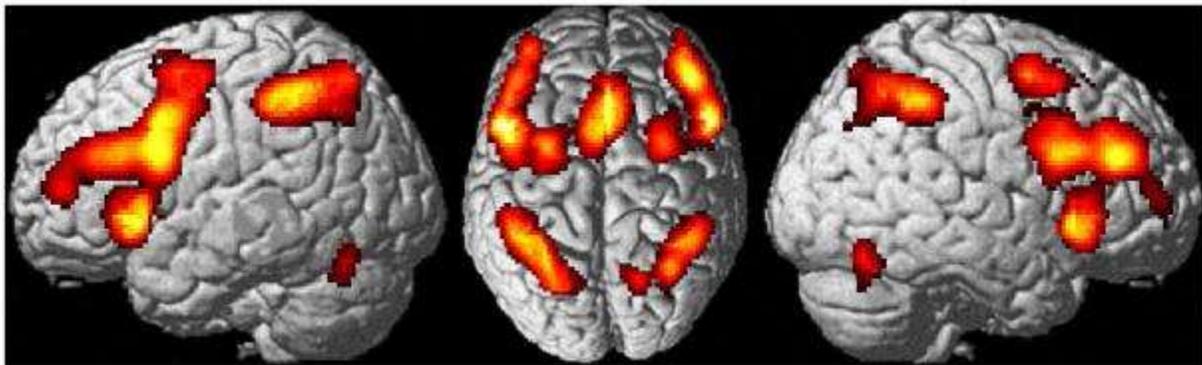
Alors que certains auteurs ont essayé de modéliser la MDT, d'autres se sont intéressés aux bases neuronales de cette fonction importante. Malgré de nombreuses études en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) qui ont tenté d'élucider les bases neuronales de la MDT et ses sous-systèmes, peu s'entendent sur quelles régions en font réellement partie, probablement en raison de la variété de tâches utilisées pour mesurer la MDT. Actuellement, il est convenu que le réseau bilatéral fronto-pariétal (voir Figure 4 ; Baddeley, 2003) sous-tend la MDT (voir Figure 4 ; Baddeley, 2003). Parmi les différents sous-systèmes de cette fonction cognitive, les bases neuronales de la boucle phonologique sont les mieux définies. Ces régions comprennent le gyrus supramarginal gauche (aussi nommé l'aire de Wernicke) ainsi que la partie operculaire et triangulaire du gyrus frontal inférieur gauche (aussi nommée aire de Broca). En effet, l'aire de Wernicke est le site de la réserve phonologique alors que l'aire de Broca (avec le cortex prémoteur gauche) est impliquée dans la répétition articulatoire (Baddeley, 2003 ; Rottschy et al., 2012). Les régions qui sous-tendent le calepin visuospatial incluent le cortex prémoteur droit (Baddeley, 2003) ou bilatéral (Rottschy et al., 2012 ; impliqué dans le maintien de l'attention visuospatiale), le cortex visuel associatif droit, le gyrus supramarginal droit, la partie orbitaire du gyrus frontal inférieur droit (Baddeley, 2003) et l'aire motrice présupplémentaire gauche (Rottschy et al., 2012). Au niveau du fonctionnement exécutif de la MDT, Baddeley et al. (2003) ont trouvé des activations dans le cortex préfrontal dorsolatéral bilatéral et les cortex inférieurs frontaux et pariétaux qui augmentent avec la charge cognitive (Baddeley, 2003).

Le corps calleux joue aussi un rôle majeur dans la MDT. Celui-ci constitue le faisceau principal qui relie les deux hémisphères et qui permet la transmission de l'information entre les aires corticales homologues (Giedd et al., 1996), notamment entre les régions gauches et droites du réseau bilatéral fronto-pariétal. Plusieurs études ont montré que l'intégrité du CC,

particulièrement au niveau du genou du CC, est corrélée avec la performance aux tâches de MDT (Arenth, Russell, Scanlon, Kessler, & Ricker, 2014 ; Kennedy & Raz, 2009 ; Zahr, Rohlfing, Pfefferbaum, & Sullivan, 2009). Le genou relie les régions préfrontales du cerveau impliquées dans la MDT et qui nécessitent souvent une coordination bilatérale (Zahr et al., 2009).

#### **Figure 4**

*Illustration de l'activation du réseau du réseau bilatéral fronto-pariétal (Rottschy et al., 2012)*



### **3 L'entraînement et la remédiation de la MDT**

Grâce à une meilleure compréhension de la base théorique de la MDT, les chercheurs ont pu appliquer ces connaissances à un domaine plus pratique: l'amélioration de la MDT. Précisons les termes utilisés ; l'entraînement réfère aux tentatives d'améliorer la MDT dans des contextes non pathologiques, alors que la remédiation réfère à l'entraînement de la MDT dans des contextes cliniques, en réponse à la détection de difficultés à activer et maintenir les informations à mémoriser (Seron & Van der Linden, 2016). Notons qu'un programme conçu pour entraîner la MDT pourrait également servir à la remédiation.

Des troubles de la MDT peuvent causer des handicaps importants, tant au niveau social que professionnel. Cela peut notamment entraîner des difficultés dans des tâches quotidiennes qui nécessitent le maintien d'information (p. ex., suivre un discours ou prendre des notes lors d'une réunion ; Seron & Van der Linden, 2016). Par ailleurs, puisque la MDT est impliquée dans

plusieurs autres fonctions cognitives, telles que le langage (Seron & Van der Linden, 2016), le fonctionnement exécutif et l'intelligence fluide (Morrison & Chein, 2011), cela peut entraîner des déficits assez étendus dans l'ensemble de la sphère cognitive (Seron & Van der Linden, 2016).

### 3.1 Les paradigmes d'entraînement de la MDT

Plusieurs programmes ont été développés pour pallier la MDT. Ces études ont suggéré que les capacités de MDT peuvent être stimulées et restaurées (Seron & Van der Linden, 2016).

Plusieurs études ont porté sur l'entraînement de la MDT, notamment dans le cas de la remédiation des troubles de la MDT suite à un TCC ou un ACV, et on observe deux grandes méthodes d'entraînement, les explicites et les implicites. En 1972, Butterfield et al. ont montré qu'il était possible d'améliorer la MCT en apprenant des stratégies de répétition subvocale aux individus avec des troubles d'apprentissage. Ils ont aussi montré qu'une stratégie spécifique peut augmenter le nombre de chiffres retenu en MCT (Klingberg, 2010). Ce type d'*entraînement explicite* utilise des stratégies telles que la pratique des stratégies de rappel (p. ex., répétition subvocale), le « chunking » (regrouper de petites unités d'information ; Klingberg, 2010) et les stratégies métacognitives (p. ex., créer des liens avec l'information existante en mémoire à long terme) (Morrison & Chein, 2011). L'entraînement explicite peut également être conceptualisé comme une amélioration de l'efficacité de la MDT, et non une amélioration de la MDT en soi (von Bastian & Oberauer, 2013). La logique sous-tendant cet entraînement correspond à l'augmentation de l'utilisation de la répétition subvocale qui est associée à une augmentation des capacités de MDT (Morrison & Chein, 2011). Par contre, la tendance des améliorations mesurées à demeurer spécifiques au matériel entraîné représente un inconvénient de l'entraînement explicite. En effet, certaines études explorant cette stratégie suggèrent que les effets ne se généralisent pas aux fonctions cognitives non entraînées (Klingberg, 2010 ; Morrison & Chein, 2011).

L'*entraînement implicite*, incluant la pratique, la rétroaction et une augmentation graduelle de la difficulté (Klingberg, 2010), correspond à un deuxième type d'entraînement de la MDT. Ce genre d'entraînement induit une augmentation de la capacité de la MDT. Dans ce cas, lorsque la demande cognitive dépasse les limites de la MDT, des changements dans les régions cérébrales qui limitent la MDT sont induits pour accommoder l'accroissement de la demande trop importante (von Bastian & Oberauer, 2013). Pour cibler l'amélioration de la MDT, les stratégies implicites tentent de limiter l'utilisation de stratégies trop spécifiques à un certain domaine, de minimiser l'automatisation, d'inclure des tâches/stimuli qui couvrent plusieurs modalités, d'obliger le maintien face à de l'interférence, d'imposer l'encodage/récupération rapide, d'adapter aux capacités des utilisateurs et d'avoir des charges cognitives élevées (Morrison & Chein, 2011). De plus, l'entraînement implicite peut soit utiliser plusieurs tâches de MDT pour avoir un impact sur plusieurs composants de ce type de mémoire (p. ex. COGMED), soit cibler une seule tâche (p. ex. tâche N-back de Verhaeghen et al. 2004) ou une seule composante de la MDT (p. ex. Dahlin, Neely et al. 2008 qui ont ciblé la composante de mise à jour de la MDT [soit la capacité maintenir de l'information qui change avec le temps]) (Morrison & Chein, 2011). L'utilisation de plusieurs tâches donne l'avantage d'augmenter la chance qu'une de celles-ci fonctionne. Compte tenu de tous ces avantages, la notion d'*entraînement implicite* a été retenue pour la conception de la tâche qui a été développée et utilisée dans cet essai doctoral. Par contre, il devient difficile par la suite de déterminer quelle tâche a eu un impact. Avec un paradigme utilisant une seule tâche, il est facile de déterminer a posteriori si cette tâche a eu un impact (Morrison & Chein, 2011).

Au niveau de l'intensité et la durée optimale d'un programme d'entraînement de la MDT, les études varient énormément et il y a peu de consensus. La durée peut varier entre trois et 100 sessions, et peut durer de dix à 45 minutes. En moyenne, les programmes comprennent

20 sessions de 30 minutes. Une étude a révélé que plus de sessions entraînent plus de transfert (Jaeggi, Buschkuhl, Jonides, & Perrig, 2008). Une autre étude suggère que des entraînements distribués mènent à de meilleurs résultats que ceux effectués en masse (Alloway, Bibile, & Lau, 2013 ; von Bastian & Oberauer, 2013).

Bien que ces études suggèrent qu'il soit possible d'améliorer la performance à des tâches spécifiques de la MDT et même induire des changements neuronaux avec des programmes d'entraînement (Dahlin, Nyberg, Bäckman, & Neely, 2008 ; Klingberg, 2010 ; Olesen, Westerberg, & Klingberg, 2004), cela ne serait utile que si ces progrès conduisaient à des améliorations réelles dans la vie quotidienne. Ainsi, plusieurs auteurs se sont interrogés sur le transfert des gains à d'autres fonctions cognitives, incluant l'inhibition, le raisonnement et l'attention (Klingberg, 2010). Les résultats de certaines études suggèrent que les améliorations se généralisent à d'autres modalités (Cicerone, 2002 ; Klingberg, 2010 ; Thorell et al., 2009). Dans le cas de l'entraînement implicite qui cible le renforcement des mécanismes de la MDT, les effets devraient être répandus à tous les processus qui nécessitent ces mécanismes (Morrison & Chein, 2011). Lorsque les effets se transfèrent à d'autres tâches de la MDT, ceci s'appelle le « near transfer » et lorsqu'on retrouve ces améliorations dans des tâches mesurant d'autres fonctions cognitives, ceci s'appelle le « far transfer ». De façon générale, plus une fonction cognitive est corrélée à la MDT, plus il y a un transfert de gains (von Bastian & Oberauer, 2013). Par contre, les effets de transfert sont controversés et peuvent varier selon la population étudiée et le type de tâche utilisée pour évaluer le transfert (Klingberg, 2010 ; Melby-Lervåg et al., 2016).

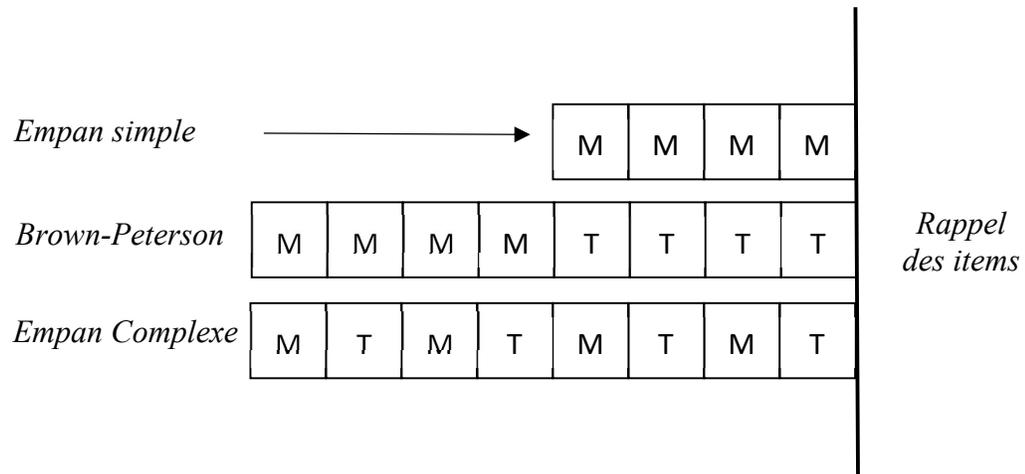
### 3.2 Les paradigmes de Brown-Peterson et d'empan complexe pour évaluer et entraîner la MDT

Pour tenter d'améliorer l'efficacité du programme d'entraînement de la MDT développé dans cet essai doctoral comparativement aux programmes d'entraînement de la MDT existants,

nous avons privilégié les principes sous-tendant les paradigmes d'évaluation de la MDT. Cette approche est encore rarement utilisée, puisque les programmes d'entraînement de la MDT existants privilégient généralement un empan simple (von Bastian & Oberauer, 2013). Pour évaluer empiriquement les capacités de MDT, les chercheurs ont élaboré plusieurs paradigmes. Parmi ces derniers, deux mesures bien établies et efficaces sont les paradigmes d'empan complexe et de Brown-Peterson. Ces paradigmes diffèrent d'un empan simple qui requiert le rappel d'une liste de stimuli de façon brève, après l'ajout d'une tâche secondaire. Ces paradigmes combinent le stockage à court terme et le traitement, définissant ainsi la MDT (Schmiedek et al., 2009). Bien qu'il y ait plusieurs variations du paradigme de Brown-Peterson, le principe de base demeure le même; on demande au participant de se rappeler quelques items après divers délais (0 à 36 s) durant lesquels ils doivent effectuer une tâche concurrente (p. ex., effectuer des additions mentales, répéter des chiffres, compter à rebours) (Guerten et al., 2016). Le paradigme d'empan complexe diffère du paradigme de Brown-Peterson par le moment de la tâche concurrente. Dans le paradigme de Brown-Peterson, la tâche concurrente survient en un seul bloc après la présentation des items à mémoriser. Dans le paradigme d'empan complexe, la tâche concurrente survient en alternance avec les items à maintenir (voir Figure 5 ; Wang et al., 2015). Comme les paradigmes d'évaluation de la MDT se sont avérés efficaces, quelques chercheurs ont choisi d'explorer leur utilisation dans l'entraînement de la MDT. Les résultats suggèrent que ces protocoles peuvent permettre non seulement l'entraînement de la MDT, mais aussi l'inhibition, le raisonnement et la compréhension de lecture, bien que ces résultats demeurent controversés. (von Bastian & Oberauer, 2013).

**Figure 5**

*Représentation schématique des paradigmes d'évaluation de la MDT*



Note : M = items de maintien, T = items de traitement. Adaptation par Tam et al. 2010.

Traduction libre par Jenel Brûlé

### 3.3 Augmentation de la difficulté d'une tâche de MDT

Une façon d'augmenter graduellement la difficulté d'une tâche de MDT souvent utilisée par les programmes d'entraînement de la MDT consiste en l'augmentation progressive du nombre d'items à mémoriser (Klingberg et al., 2002 ; Shipstead et al., 2010 ; Westerberg et al., 2007). Toutefois, le modèle de Baddeley (2003, 2012), et particulièrement les recherches menées sur la boucle phonologique et l'administrateur central, illustre que d'autres facteurs qui surchargent les capacités de l'utilisateur pourraient également permettre d'augmenter la difficulté d'une tâche de MDT. Les distracteurs et les tâches concurrentes introduits durant la rétention d'information à court terme diminuent la performance lors du rappel de cette information (Gazzaley & Nobre, 2012). L'effet de fréquence montre que les mots plus rares dans notre lexique sont plus difficiles à retenir (Hulme et al., 1997). Finalement, l'effet de longueur de mots suggère que les items plus

longs sont plus difficiles à évoquer (Baddeley, 2012). Il pourrait également être intéressant d'explorer l'impact de la complexité conceptuelle des propos à mémoriser.

### 3.4 Entraînement des fonctions cognitives à l'aide de la réalité virtuelle

Un problème avec les tâches de MDT existantes, conçues soit pour l'évaluation ou l'entraînement, est la tendance à réduire des comportements de la vie quotidienne à des processus cognitifs isolés. Ainsi, des tâches traditionnelles de MDT peuvent différer des demandes de la vraie vie et peuvent donc limiter la généralisation de ces capacités. Conséquemment, pour améliorer les résultats d'un programme d'entraînement de la MDT, il est probablement nécessaire d'utiliser des outils qui peuvent plus fortement imiter le fonctionnement d'un individu dans des contextes naturels, comme la réalité virtuelle (Rizzo et al., 2004).

Fuchs (2006) décrit la réalité virtuelle (RV) comme permettant « *de s'extraire de la réalité physique pour changer virtuellement de **temps**, de **lieu** et (ou) de type d'**interaction** : interaction avec un environnement simulant la réalité ou interaction avec un monde imaginaire ou symbolique.* » (Fuchs, 2006, p. 7). Les chercheurs dans le domaine de la neuropsychologie clinique utilisent de plus en plus la RV. Après avoir été utilisée dans le contexte de l'évaluation des fonctions attentionnelles, exécutives ou mnésiques, elle commence à être utilisée pour la remédiation de celles-ci (Nolin et al., 2019).

Les avantages d'utiliser la réalité virtuelle incluent la possibilité de proposer un environnement qui se veut écologique et sécuritaire, tout en maintenant le contrôle sur les stimuli présentés (Nolin et al., 2019 ; Rizzo et al., 2004 ; Schultheis & Rizzo, 2001). Dans le cas de la remédiation à la suite d'une lésion cérébrale, la réalité virtuelle a le potentiel de permettre la création d'environnements individualisés et enrichis qui peuvent stimuler la plasticité cérébrale (Levin, 2011), effet qui peut être mesuré à l'aide de la neuroimagerie (Ansado et al., 2020). Le

transfert des gains à la vie quotidienne demeure le but ultime de l'utilisation de la réalité virtuelle pour la remédiation (Banville et al., 2019). Certaines études soutiennent le rapport entre la performance dans la réalité virtuelle et dans la vie de tous les jours, supportant ainsi l'hypothèse que les environnements virtuels soient plus écologiques que les tests papier-crayons (Banville et al., 2019 ; Weiss et al., 2006). Finalement, Weiss et al., (2016) ont documenté un autre attrait à la réalité virtuelle lors d'une étude sur l'amélioration de l'attention, soit son aspect ludique. Une activité de remédiation stimulante peut augmenter la motivation et augmenter la conformité au traitement.

Plusieurs études effectuées au cours des dernières années suggèrent qu'un environnement virtuel peut permettre l'évaluation des fonctions cognitives de manière efficace (Banville et al., 2010, Banville et al., 2019 ; Christiansen et al., 1998 ; Nolin et al., 2019 ; Weiss et al., 2006). La réalité virtuelle ne se limite pas à l'évaluation, car la répétition des tâches à l'intérieur de ces environnements peut permettre l'entraînement des fonctions cognitives, tel que l'attention spatiale, les fonctions exécutives, l'attention, la mémoire de travail, la mémoire épisodique, la mémoire prospective, etc. Plusieurs études visant l'entraînement de ces fonctions révèlent que la réalité virtuelle peut entraîner des améliorations mesurables (Banville et al., 2010 ; Banville et al., 2019 ; Caglio et al., 2012 ; Cho et al., 2004 ; Gamito et al., 2017 ; Nolin et al., 2019 ; Weiss et al., 2006). Ces études suggèrent que la réalité virtuelle peut s'avérer utile, mais peu de programmes ciblent la MDT et ceux qui le font l'entraînent en même temps que d'autres fonctions, ce qui rend difficile d'isoler la source des gains en MDT.

La technologie semble prometteuse, mais le risque d'une surcharge cognitive lors de l'utilisation de l'interface de réalité virtuelle constitue une limitation lors de l'entraînement cognitif en réalité virtuelle. En effet, un article publié en 2017 suggère que des interfaces inefficaces et

complexes peuvent interférer avec l'évaluation des fonctions cognitives. C'est-à-dire que plus un environnement virtuel nécessite l'interaction avec un appareil de contrôle, plus cet environnement peut frustrer l'utilisateur. Cet effet se produit notamment chez les personnes âgées qui ont plus de difficulté avec cette technologie (Banville et al., 2017), d'où l'importance de développer des tâches utilisant une interface simple et limiter les interactions complexes de la part de l'utilisateur, pour mieux cibler les fonctions qu'on veut améliorer et éviter la frustration qui pourrait entraîner l'abandon de la tâche.

En conclusion, les chercheurs ont développé plusieurs environnements virtuels pour stimuler les fonctions cognitives et améliorer certains troubles cognitifs, et certains d'entre eux donnent des résultats prometteurs (Nolin et al., 2019). Cependant, à notre connaissance, aucun programme conçu spécifiquement pour stimuler la MDT n'existe actuellement, bien que quelques-uns peuvent avoir un impact sur la MDT dans le cadre d'un protocole d'entraînement touchant une multitude de fonctions cognitives en même temps (Nolin et al., 2019).

#### **4 Objectifs et hypothèses de l'essai doctoral**

De nombreuses études suggèrent que l'entraînement de la MDT puisse permettre l'amélioration de la MDT (Klingberg, 2010; Morrison & Chein, 2011; von Bastian & Oberauer, 2013). D'autres études ont exploré les bénéfices de la réalité virtuelle pour l'évaluation et l'entraînement des fonctions cognitives. Pour ce projet de doctorat, nous avons développé un programme d'entraînement de la MDT dans un environnement virtuel. La candidate au doctorat responsable du projet a activement contribué à la conception, le développement et la vérification du programme avant le début de l'étude pilote faisant l'objet de cet essai doctoral.

Cet essai doctoral a pour objectif principal de valider les facteurs de complexité utilisés pour créer le nouveau programme de réalité virtuelle qui, ultérieurement, sera utilisé comme

programme de remédiation de la MDT pour des personnes ayant des troubles de la MDT à la suite d'une lésion cérébrale.

Nous avons conçu le *Virtual Reality Working Memory Training Program* (VR-WORK-M) pour simuler une situation de travail (c.-à-d. un dîner d'affaires). Le but ultime du programme VR-WORK-M demeure l'entraînement de la MDT de façon écologique en reproduisant une situation de la vie quotidienne. Dans cette simulation, les utilisateurs vont devoir répéter une série d'items entendus au début de l'immersion. Cette série d'items se regroupe sous le vocable « projet d'affaires ». La rétention et la présentation de ce projet d'affaires représentent la tâche de MDT. Le VR-WORK-M combine quatre facteurs de complexité pour augmenter la difficulté de la tâche de MDT : (a) Type d'items du projet d'affaires ; (b) Nombre d'items à répéter dans le projet d'affaires ; (c) Nombre de sous-tâches à réaliser avant de présenter le projet d'affaires ; et (d) Nombre de distracteurs intervenant avant de présenter le projet d'affaires. La combinaison de ces facteurs de complexité donne 54 variations, qui se nomment les étapes du programme dans le VR-WORK-M.

L'étude pilote a pour objectif de quantifier l'effet des facteurs de complexité sur l'accroissement de la difficulté de la tâche de MDT à travers les étapes du programme chez les participants en santé. Afin de répondre à cet objectif, les participants ont complété les 54 étapes du programme en ordre aléatoire. Les quatre hypothèses avec leurs sous-hypothèses concordantes suivantes décrivent les effets attendus.

La première hypothèse (H1) propose que le facteur de complexité Type d'items dans le projet d'affaires aura un impact sur la difficulté de la tâche de MDT. Les trois sous-hypothèses utilisées pour vérifier ce constat sont : H1.1) les étapes avec items fréquents seront mieux réussies que les étapes avec items rares [Fréquents > Rares] ; H1.2) les étapes avec items rares seront mieux

réussies que les étapes avec items conceptuels [Rares > Conceptuel] ; et H1.3) les étapes avec items fréquents seront mieux réussies que les étapes avec items conceptuels [Fréquents > Conceptuel].

La deuxième hypothèse (H2) propose que le facteur de complexité Nombre d'items à répéter dans le projet d'affaires aura un impact sur la difficulté de la tâche de MDT. Les trois sous-hypothèses utilisées pour vérifier ce constat sont : H2.1) les étapes avec quatre items seront mieux réussies que les étapes avec cinq items [4 > 5] ; H2.2) les étapes avec cinq items seront mieux réussies que les étapes avec six items [5 > 6] ; et H2.3) les étapes avec quatre items seront mieux réussies que les étapes avec six items [4 > 6].

La troisième hypothèse (H3) propose que la difficulté de la tâche de MDT sera affectée par le facteur de complexité Nombre de sous-tâches à réaliser avant de présenter le projet d'affaires. Les trois sous-hypothèses utilisées pour vérifier ce constat sont : H3.1) les étapes avec aucune sous-tâche seront mieux réussies que les étapes avec une sous-tâche [0 > 1] ; H3.2) les étapes avec une sous-tâche seront mieux réussies que les étapes avec deux sous-tâches [1 > 2] ; et H3.3) les étapes avec aucune sous-tâche seront mieux réussies que les étapes avec deux sous-tâches [0 > 2].

La quatrième hypothèse (H4) propose que la difficulté de la tâche de MDT sera affectée par le facteur de complexité Nombre de distracteurs intervenants avant de présenter le projet d'affaires. Les trois sous-hypothèses utilisées pour vérifier ce constat sont : H4.1) les étapes avec aucun distracteur seront mieux réussies que les étapes avec un distracteur [0 > 1] ; H4.2) les étapes avec un distracteur seront mieux réussies que les étapes avec deux distracteurs [1 > 2] ; et H4.3) les étapes avec aucun distracteur seront mieux réussies que les étapes avec deux distracteurs [0 > 2].

## CHAPITRE 2 : MÉTHODE

### Participants

Il était initialement prévu de recruter 20 participants en bonne santé, âgés de 18 à 45 ans pour participer à cette étude. En raison de la pandémie mondiale de la COVID-19, le recrutement a dû cesser après 14 participants. Par contre, les analyses statistiques effectuées avec ce nombre de participants légèrement plus réduit ont révélé que nous pouvons tout de même valider nos hypothèses principales. Notre groupe de participants se composait de trois hommes et onze femmes, âgés entre vingt-deux et trente-deux ans, en bonne santé. Il semble pertinent de mentionner que l'un des participants avait un diagnostic de TDAH et une autre avait déjà souffert d'une dépression par le passé. Par contre leur présence n'influence pas les décisions statistiques (voir Tableau 1 pour les données sociodémographiques des participants).

### Tableau 1

#### *Données sociodémographiques des participants*

	Participants (N = 14)
Âge moyen (en année)	26 (3.50)
Femme – Homme	3 – 11
Participants rapportant un trouble psychologique/ psychiatrique par le passé	1
Participants rapportant un trouble neurodéveloppemental actuel	1
Participants rapportant un trouble neurologique actuel	0
Participants rapportant déjà avoir subi un traumatisme craniocérébral actuel	0
Participants ayant des problèmes de vision corrigés avec verres correcteurs	6

*Note* : l'écart type est présenté entre parenthèses après la moyenne.

**Critères d'inclusion** : Des adultes en santé, âgés de dix-huit à quarante-cinq ans.

**Critères d'exclusion** : Les participants ne devaient pas rapporter souffrir actuellement de troubles psychiatriques ou neurologiques.

## Appareillage et outils de mesure

**Questionnaires.** Nous avons fait passer un questionnaire de renseignements généraux aux participants afin de vérifier leur éligibilité à l'étude (voir annexe A). Ce questionnaire permettait d'obtenir les données démographiques, mais aussi de vérifier s'ils répondaient aux critères d'inclusion et d'exclusion.

**Matériel informatique.** Le matériel utilisé était un visiocasque HTC Vive (version standard) possédant une résolution de 1200x1080, un taux de rafraîchissement de 90 Hertz et un champ de vision de 110 degrés. Il était relié à un ordinateur de bureau PC de marque Ciara, dont les caractéristiques techniques incluaient : un CPU Intel i7-470 d'une capacité de 3,6 GHz, 16 Go de mémoire RAM, une carte graphique NVIDIA GeForce GTX 980, et un logiciel d'exploitation Windows 8.1 64 bits.

**Stimuli.** Nous avons utilisé un environnement virtuel en 3D représentant un restaurant.

### Figure 6

*Capture d'écran de l'environnement virtuel illustrant le point de vue du participant avant de débiter la présentation de son projet d'affaires dans le VR-WORK-M.*



### **Programme de remédiation de la MDT: (VR-WORK-M)**

Le programme VR-WORK-M recrée un environnement de restaurant où les participants doivent présenter un projet d'affaires à un homme d'affaires. Ils reçoivent des consignes à propos du projet d'affaires (p. ex., on veut ouvrir une pâtisserie), incluant une série de mots à répéter pour décrire en quoi consiste leur projet (p. ex., on va vendre des croissants et des chocolatinnes). Il y a dix-huit thèmes de projet d'affaires (voir Tableau 2). Lors de la présentation, divers distracteurs et sous-tâches peuvent survenir. Une fois la présentation effectuée, l'administrateur lance une autre étape avec un nouveau projet d'affaires à présenter. Lors de l'utilisation du programme avec une population clinique, le programme sera présenté de façon progressive. Pour entraîner la MDT, il est nécessaire de continuellement et graduellement augmenter la difficulté de la tâche de MDT afin de l'utiliser dans un programme d'entraînement. Mais rappelons que l'objectif de l'étude pilote consiste plutôt à documenter l'impact des facteurs de complexité sur la difficulté des étapes. Par conséquent, les étapes seront présentées dans un ordre aléatoire afin de contrôler pour l'impact potentiel des facteurs de complexité. Les prochaines sections décrivent le VR-WORK-M en détail.

**Tableau 2***Présentation des dix-huit thèmes du projet d'affaires*

	<b>Thème 1</b>	<b>Thème 2</b>	<b>Thème 3</b>
4 items	1 On veut ouvrir une pâtisserie	1 On veut ouvrir un magasin de fleurs	1 On veut offrir une garderie pour les enfants de nos employés.
	2 On va vendre :	2 On va vendre :	2 Les employés : arriveront plus facilement à l'heure
	3 Des croissants	3 Des pétunias	3 Se sentiront plus appréciés
	4 Des chocolatinnes	4 Des chrysanthèmes	4 Seront plus rassurés
5 items	5 Des gâteaux	5 Des bégonias	5 Seront moins absents
6 items	6 Des tartes	6 Des œillets	6 Seront moins stressés
	<b>Thème 4</b>	<b>Thème 5</b>	<b>Thème 6</b>
4 items	1 On veut ouvrir un magasin de vêtements	1 On veut offrir notre magazine en ligne	1 On veut organiser un voyage en groupe pour nos employés.
	2 On va vendre :	2 On va couvrir les sujets suivants :	2 Ça permettra : de consolider l'équipe
	3 Des jupes	3 La pêche	3 Aux employés de mieux se connaître
	4 Des ceintures	4 L'horticulture	4 Aux employés de se changer les idées
5 items	5 Des pantalons	5 La voile	5 Aux employés de s'affirmer
	6 Des souliers	6 La zoologie	6 Aux employés d'apprendre à collaborer

	<b>Thème 7</b>	<b>Thème 8</b>	<b>Thème 9</b>
4 items	1 On veut ouvrir un magasin de meubles 2 On va vendre : 3 Des lits 4 Des bibliothèques	1 On veut ouvrir un magasin d'accessoires de cuisine 2 On va vendre 3 Des batteurs 4 Des mixeurs	1 On veut commencer un jardin communautaire. Les membres de la communauté : 2 Vont apprendre à jardiner 3 Vont se rapprocher 4 Auront accès à des produits frais 5 Vont pouvoir se relaxer
5 items	5 Des lampes	5 Des spatules	
6 items	6 Des chaises	6 Des passoires	6 Ça va promouvoir le compostage
	<b>Thème 10</b>	<b>Thème 11</b>	<b>Thème 12</b>
4 items	1 On veut ouvrir un concessionnaire automobile 2 On va vendre : 3 Des autos sport 4 Des autos familiales	1 On veut ouvrir un magasin de thé 2 On va offrir les thés suivants : 3 Thé vert 4 Camomille	1 On veut offrir un service de repas santé pour nos employés. Les employés : 2 Seront en meilleure santé 3 Auront moins de préparation à faire 4 Auront plus de temps libre
5 items	5 Des camions	5 Chai	5 Seront plus productifs
6 items	6 Des autos électriques	6 Gingembre	6 Amélioreront leurs habitudes alimentaires

	<b>Thème 13</b>	<b>Thème 14</b>	<b>Thème 15</b>
4 items	1 On veut créer une compagnie de jeux de société 2 On va inventer des jeux qui auront pour but de : 3 Dessiner 4 S'amuser	1 On veut ouvrir un spa 2 On va offrir les services suivants : 3 Massages 4 Manucure	1 On veut offrir des cours de gestion à nos employés. Les employés vont : 2 Plus apprécier la compagnie 3 Devenir des leaders 4 Améliorer leurs compétences
5 items	5 Chanter	5 Faciales	5 Augmenter leur confiance en soi
6 items	6 Gagner	6 Hydrothérapie	6 Augmenter leurs opportunités d'avancement
	<b>Thème 16</b>	<b>Thème 17</b>	<b>Thème 18</b>
4 items	1 On veut créer une compagnie de prothèse 2 On va fabriquer des prothèses pour: 3 Les genoux 4 Les épaules	1 On veut ouvrir un centre sportif 2 On va offrir les activités suivantes : 3 Natation 4 Plongeon	1 On veut commencer un bulletin d'information dans notre compagnie. Ceci facilitera : 2 Le partage d'informations 3 L'expression personnelle 4 La créativité des employés
5 items	5 Les mains	5 Golf	5 Les relations interpersonnelles
6 items	6 Les pieds	6 Badminton	6 La distribution des publicités

## **La tâche de MDT du VR-WORK-M : Retenir et présenter les items du projet d'affaires**

La tâche de MDT repose sur la rétention et la présentation des items d'un projet d'affaires. Le projet d'affaires est entendu par le participant au début de chaque étape et la présentation des items du projet d'affaires est effectuée à la fin de l'étape quand l'avatar de l'homme d'affaires dit: « Je vous écoute, vous pouvez m'expliquer votre projet ».

### **Augmentation de la difficulté de la tâche de MDT**

Quatre facteurs de complexité, avec trois niveaux chacun, sont manipulés pour augmenter la difficulté de la tâche de MDT : (a) Type d'items dans le projet d'affaires, avec trois types d'items (fréquents vs rares vs conceptuels) ; (b) Nombre d'items à répéter dans le projet d'affaires, avec trois quantités d'items à retenir (4 vs 5 vs 6) ; (c) Nombre de sous-tâches à réaliser avant de présenter le projet d'affaires, avec trois quantités de sous tâches (0 vs 1 vs 2) ; et (d) Nombre de distracteurs intervenants avant de présenter le projet d'affaire, avec trois quantités de distracteurs (0 vs 1 vs 2).

La combinaison des trois niveaux de complexité par facteur permet d'avoir 54 étapes (voir Tableau 3). Il s'avère important de préciser ici le sens accordé aux mots item et étape. Dans le VR-WORK-M, item réfère aux objets ou concepts à mémoriser et répéter (p. ex., jeux de société, chanter). Le mot étape réfère aux 54 occurrences de la tâche à effectuer. Si le VR-WORK-M représentait un instrument de mesure, les étapes pourraient en quelque sorte représenter les items d'un test complétés par les participants. Puisque l'outil vise l'entraînement, et éventuellement la remédiation de la MDT, le terme étape a été privilégié. D'autant plus que lorsqu'appliqué dans un programme de remédiation, contrairement à la présente étude, les étapes seront présentées dans un ordre relativement croissant de difficulté.

**Tableau 3**

*Présentation de la structure du programme, des thèmes et des quatre facteurs de complexité imbriqués dans les 54 étapes.*

	Type d'items dans la tâche de MDT				
	# de sous-tâches	# de distracteurs	Tâche de MDT : items fréquents	Tâche de MDT : items rares	Tâche de MDT : items conceptuels
Nombre d'items dans la tâche de MDT : 4 items	0	0	1 (Thème 1)	2 (Thème 2)	3 (Thème 3)
	0	1	4 (Thème 4)	5 (Thème 5)	6 (Thème 6)
	1	1	7 (Thème 7)	8 (Thème 8)	9 (Thème 9)
	1	2	10 (Thème 10)	11 (Thème 11)	12 (Thème 12)
	2	1	13 (Thème 13)	14 (Thème 14)	15 (Thème 15)
	2	2	16 (Thème 16)	17 (Thème 17)	18 (Thème 18)
Nombre d'items dans la tâche de MDT : 5 items	0	0	19 (Thème 1)	20 (Thème 2)	21 (Thème 3)
	0	1	22 (Thème 4)	23 (Thème 5)	24 (Thème 6)
	1	1	25 (Thème 7)	26 (Thème 8)	27 (Thème 9)
	1	2	28 (Thème 10)	29 (Thème 11)	30 (Thème 12)
	2	1	31 (Thème 13)	32 (Thème 14)	33 (Thème 15)
	2	2	34 (Thème 16)	35 (Thème 17)	36 (Thème 18)
Nombre d'items dans la tâche de MDT : 6 items	0	0	37 (Thème 1)	38 (Thème 2)	39 (Thème 3)
	0	1	40 (Thème 4)	41 (Thème 5)	42 (Thème 6)
	1	1	43 (Thème 7)	44 (Thème 8)	45 (Thème 9)
	1	2	46 (Thème 10)	47 (Thème 11)	48 (Thème 12)
	2	1	49 (Thème 13)	50 (Thème 14)	51 (Thème 15)
	2	2	52 (Thème 16)	53 (Thème 17)	54 (Thème 18)

- a. **Type d'items dans le projet d'affaires (tâche de MDT) : fréquent** (p. ex. mots : « croissants » ; « chocolatines » ; « biscuits » ; « tartes ») vs **rare** (p. ex. mots : « Pétunia » ; « violette » ; « Chrysanthème » ; « Bégonia ») vs **conceptuel** (p. ex. « Les employés se sentiront appréciés » ; « Plus facile d'adhérer à l'horaire de travail » ; « Moins de manque de travail » ; « Moins de stress au travail »). Nous avons vérifié la fréquence des mots dans le vocabulaire courant à l'aide d'une base de données lexicales (New et al., 2001).

- b. **Nombre d'items à répéter dans le projet d'affaires** : 4 (*p. ex.* On veut ouvrir une pâtisserie ; On va vendre : des croissants, des chocolatines) *vs* 5 (*p. ex.* On veut ouvrir une pâtisserie ; On va vendre : des croissants, des chocolatines, des biscuits) *vs* 6 (*p. ex.* On veut ouvrir une pâtisserie ; On va vendre : des croissants, des chocolatines, des biscuits, des tartes).
- c. **Nombre de sous-tâches à réaliser avant de présenter le projet d'affaires** : Les sous-tâches représentent des tâches additionnelles qui doivent être accomplies entre le moment où les participants entendent les éléments à répéter et le moment où ils doivent les répéter. Pour les sous-tâches, les participants doivent dire quelque chose à l'homme d'affaires, commander quelque chose, rajouter une information au projet ou répéter un numéro de poste téléphonique. Le nombre de sous-tâches varie (0 *vs* 1 *vs* 2).
- d. **Nombre de distracteurs intervenants avant de présenter le projet d'affaires** : Des distracteurs se rajoutent pour interférer avec le maintien des items en MDT. Il y a des distracteurs auditifs et visuels. Les distracteurs auditifs sont des clés qui tombent, des verres qui trinquent, un plateau qui tombe, une chaise qui traîne sur le plancher, un verre qui casse, un téléphone qui sonne, la musique qui devient très forte, une alarme de voiture, un bébé qui pleure, un klaxon d'une voiture, un accident de voiture et une serveuse qui chante bonne fête. Les distracteurs visuels sont une porte qui s'ouvre, une porte qui ferme, une personne qui appelle la serveuse, une personne qui s'assoie à une autre table, une personne qui se lève et qui parte, une TV qui s'allume et quelqu'un qui tombe en marchant près de la table où est situé le participant. Le nombre de distracteurs varie (0 *vs* 1 *vs* 2).

## Figure 7

*Capture d'écran de l'expérimentateur illustrant un distracteur (une personne qui tombe en marchant entre les tables, au centre de l'image) et (en bleu, en haut et en bas de l'image) le niveau actuel et les réponses attendues du participant.*



Les combinaisons des sous-tâches et des distracteurs permettent d'avoir six façons dont les étapes se déroulent, ce qui devrait aider à maintenir l'intérêt des utilisateurs du programme (voir Tableau 4).

**Tableau 4**

*Les six façons dont les étapes se déroulent*

	<b># de sous-tâches et distracteurs</b>	<b>Déroulement de l'étape</b>
1	0 sous-tâche 0 distracteur	Participant entend le projet d'affaires Participant présente le projet d'affaires
2	0 sous-tâche 1 distracteur	Participant entend le projet d'affaires Distracteur : Porte qui s'ouvre Participant présente le projet d'affaires Participant entend le projet d'affaires Distracteur : clés qui tombent Participant présente le projet d'affaires Participant entend le projet d'affaires Distracteur : verres qui trinquent Participant présente le projet d'affaires
3	1 sous-tâche 1 distracteur	Participant entend le projet d'affaires Sous-tâche : participant se présente Distracteur : Plateau qui tombe Participant présente le projet d'affaires Participant entend le projet d'affaires Sous-tâche : participant dit qu'il y avait beaucoup de circulation Distracteur : personne qui appelle la serveuse Participant présente le projet d'affaires Participant entend le projet d'affaires Sous-tâche : participant donne le nom de la compagnie Distracteur : chaise traîne sur le plancher Participant présente le projet d'affaires
4	1 sous-tâche 2 distracteurs	Participant entend le projet d'affaires Distracteur : verre qui casse Sous-tâche : participant présente son associée Distracteur : personne qui s'assoit à une autre table Participant présente le projet d'affaires Participant entend le projet d'affaires Distracteur : porte que ferme Sous-tâche : participant dit que ça fait 3 ans qu'il travaille avec l'associée Distracteur : un TV qui s'allume Participant présente le projet d'affaires Participant entend le projet d'affaires Distracteur : téléphone sonne Sous-tâche : participant dit que c'est lui qui va faire la présentation Distracteur : personne qui se lève et part d'une autre table Participant présente le projet d'affaires

5	2 sous-tâches 1 distracteur	Participant entend le projet d'affaires Sous-tâche : participant commande un café Sous-tâche : participant commande une salade niçoise Distracteur : son d'un accident de voiture Participant présente le projet d'affaires
		Participant entend le projet d'affaires Sous-tâche : participant commande une limonade Sous-tâche : participant commande une soupe à l'oignon Distracteur : musique devient très fort Participant présente le projet d'affaires
		Participant entend le projet d'affaires Sous-tâche : participant commande un thé glacé Sous-tâche : participant commande une salade de poulpe Distracteur : son d'une alarme de voiture Participant présente le projet d'affaires
6	2 sous-tâches 2 distracteurs	Participant entend le projet d'affaires Sous-tâche : participant répète # de poste téléphonique Distracteur : serveuse chante bonne fête Distracteur : quelqu'un tombe en passant Sous-tâche : participant dit que le projet est très prometteur Participant présente le projet d'affaires
		Participant entend le projet d'affaires Sous-tâche : participant répète # de poste téléphonique Distracteur : bébé commence à pleurer Distracteur : quelqu'un sort de la salle de bain Sous-tâche : participant dit que le projet est le résultat d'une longue étude de marché Participant présente le projet d'affaires
		Participant entend le projet d'affaires Sous-tâche : participant répète # de poste téléphonique Distracteur : klaxon de voiture à l'extérieur Distracteur : quelqu'un rentre dans la salle de bain Sous-tâche : participant dit que le projet est le fruit d'un long travail de préparation Participant présente le projet d'affaires

## Procédure

Les participants ont complété les 54 étapes du programme en ordre aléatoire dans le cadre d'une rencontre, d'une durée d'une heure et demie, entrecoupée de deux pauses de 10 minutes. Nous avons ajusté le nombre et la durée des pauses selon les besoins du participant.

Déroulement d'une rencontre avec un participant :

- Le participant arrive au laboratoire.
- Le participant lit et signe le formulaire de consentement.
- Le questionnaire de renseignements généraux est rempli avec l'examinatrice.
- L'examinatrice explique le fonctionnement du programme VR-WORK-M.
  - Cette explication varie, puisqu'elle dépend du participant ; ce qui importe est que le participant comprenne ce qu'il doit faire dans l'immersion.
- L'examinatrice lance l'étape 0 ; un message préenregistré qui donne une explication standardisée de la tâche de MDT et le déroulement de l'immersion. Ceci permet au participant de s'habituer à l'immersion et d'ajuster le casque si nécessaire.
- L'examinatrice lance la première étape de l'expérience selon l'ordre aléatoire généré antérieurement et inscrite dans un tableau *Excel*.
- L'examinatrice enregistre à l'écrit les items du projet d'affaires présentés par le participant.
- L'examinatrice continue à lancer les étapes selon l'ordre aléatoire et à enregistrer les réponses.

Cette étude a été approuvée par le comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec en Outaouais.

## **Définition de succès**

Pour chaque participant, nous avons déterminé s'il a réussi ou non chaque étape. Pour notre étude, les étapes étaient réussies quand le participant présentait tous les items du projet d'affaires et ne rajoutait pas d'items ne faisant pas partie du projet d'affaires. Nous avons effectué des analyses préliminaires pour évaluer s'il était opportun de considérer une étape comme réussie si un participant omettait un des items du projet d'affaires lors de la présentation de ce dernier. Les taux de réussite se sont avérés très similaires à ceux obtenus en ne tolérant aucune omission. Nous avons donc décidé de retenir le critère plus rigoureux de zéro omission et zéro commission.

### *Mesure de taux de réussite (variable dépendante)*

Pour quantifier la difficulté de la tâche de MDT, nous avons calculé le pourcentage d'étapes réussies pour chaque niveau de chaque facteur de complexité pour chaque participant. Les moyennes analysées reposent donc sur les données pour chaque facteur, agrégées en fonction des autres facteurs (p. ex., la moyenne des items conceptuels provient des données obtenues pour les tâches avec 4, 5 et 6 items à répéter, ainsi que les trois quantités de sous-tâches et les trois quantités de distracteurs).

Notons qu'on a vu un impact culturel dans le premier thème de nos projets d'affaires (« on veut ouvrir une pâtisserie »). En effet, quelques participants (21.43%) ont dit: « on veut ouvrir une boulangerie » lors de la présentation du projet d'affaire, ce qui a entraîné un échec pour cette étape. Par contre, nous avons décidé de garder ce thème dans nos analyses par souci de garder un équilibre dans les facteurs de complexité, et après avoir considéré qu'au Québec il peut exister une certaine confusion entre une pâtisserie et une boulangerie chez les consommateurs qui fréquentent surtout les commerces à grande surface et les épiceries.

## CHAPITRE 3 : RÉSULTATS

La normalité de la distribution a été examinée à l'aide du test statistique Shapiro-Wilk. Ces tests ont fait ressortir un problème de normalité de distribution en ce qui concerne le facteur de complexité a, le Type d'items dans le projet d'affaires. Plus spécifiquement, les items fréquents et les items conceptuels ne respectent pas le postulat de la normalité de la distribution. Dans ces cas, nous avons utilisé des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis. Puisque ces analyses non paramétriques donnaient le même résultat que les ANOVAs à mesures répétées, et que ces dernières sont plus simples à interpréter, les résultats des ANOVAs sont rapportés et utilisés pour interpréter tous les résultats.

Quatre analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées ont été effectuées afin d'évaluer l'impact des facteurs de complexité sur la difficulté de la tâche de MDT. Des tests de Mauchly ont été réalisés pour vérifier le postulat de sphéricité et ont confirmé le respect de ce postulat pour les quatre facteurs de complexité. Compte tenu du nombre de facteurs de complexité comparés, une correction de Bonferroni a été appliquée aux tests d'effets principaux. Ainsi, le seuil de significativité statistique était fixé à .012 (alpha de .05/4 comparaisons). Les contrastes effectués a posteriori ne sont pas orthogonaux, alors la correction de Bonferroni a aussi été appliquée aux comparaisons entre les niveaux de complexité des différents facteurs (alpha critique fixé à .017).

Les résultats présentés au Tableau 5 ont montré un effet significatif du Type d'items dans le projet d'affaires sur le taux de réussite ( $F [2, 26] = 52.18, p < 0.001$ ). La taille de l'effet du Type d'items ( $\eta^2_{\text{partiel}} = 0.80$ ) était grande. Des comparaisons multiples faites a posteriori avec la correction de Bonferroni ont révélé une différence moyenne non significative de -3.18 ( $p = 1.00$ , 95 % CI [-15.64, 9.29]) entre les étapes avec des items fréquents et les étapes avec des items rares.

Ces mêmes comparaisons ont également révélé une différence moyenne significative de 41.27 ( $p < 0.001$ , 95 % CI [28.11, 54.43]) entre les étapes avec des items fréquents et les étapes avec des items conceptuels. Ainsi, le taux de réussite était supérieur pour les étapes avec des items fréquents que celui pour les étapes avec les items conceptuels. Les comparaisons post-hoc ont également révélé une différence moyenne significative (44.44,  $p < 0.001$ , 95 % CI [30.14, 58.75]) entre les étapes avec des items rares et les étapes avec des items conceptuels, suggérant alors que les étapes avec les items rares étaient mieux réussies que les étapes avec les items conceptuels.

### Tableau 5

*Moyennes (et écarts-types) des taux de réussite pour les quatre facteurs de complexité du VR-WORK-M et leurs niveaux respectifs (N=14).*

Facteurs de complexité	Niveaux de facteurs de complexité		
Type d'items dans le projet d'affaires	Fréquents	Rares	Conceptuels
	57.14	60.32	15.87
	(16.80)	(20.31)	(10.19)
Nombre d'items à répéter dans le projet d'affaires	4	5	6
	50.79	46.43	36.11
	(11.91)	(15.95)	(16.12)
Nombre de sous-tâches à réaliser avant de présenter le projet d'affaires	0	1	2
	53.17	40.48	39.68
	(12.08)	(17.89)	(15.69)
Nombre de distracteurs intervenants avant de présenter le projet d'affaires	0	1	2
	55.56	51.06	28.97
	(14.45)	(12.08)	(19.51)

Les résultats ont aussi montré un effet significatif du Nombre d'items sur le taux de réussite ( $F [2, 26] = 8.48, p < 0.01$ ). La taille de l'effet ( $\eta^2_{\text{partiel}} = 0.40$ ) du Nombre d'items était grande. En effet, des comparaisons multiples faites a posteriori avec la correction de Bonferroni ont révélé une différence moyenne significative entre les étapes avec 4 items et les étapes avec 6 items (14.68,  $p < 0.001$ , 95 % CI [8.16, 21.20]), suggérant que les étapes avec 4 items étaient mieux réussies que les étapes avec 6 items. Ces comparaisons post-hoc n'ont pas révélé une différence moyenne significative entre les étapes avec 4 et les étapes avec 5 items (4.37,  $p = 0.97$ , 95 % CI [-7.30, 16.03]), ni entre les étapes avec 5 items et les étapes avec 6 items (10.32,  $p = 0.08$ , 95 % CI [-0.86, 21.50]).

Les résultats révèlent un effet significatif du Nombre de sous-tâches à réaliser avant de présenter le projet d'affaires sur le taux de réussite ( $F [2, 26] = 6.58, p < 0.01$ ). La taille de l'effet ( $\eta^2_{\text{partiel}} = 0.34$ ) du Nombre d'items était grande. En effet, des comparaisons multiples faites a posteriori avec la correction de Bonferroni n'ont pas révélé une différence moyenne significative entre les étapes avec 0 sous-tâche et les étapes avec 1 sous-tâche (12.70,  $p = 0.032$ , 95 % CI [1.01, 24.39]). En revanche, ces comparaisons post-hoc ont révélé une différence moyenne significative entre les étapes avec 0 sous-tâche et les étapes avec 2 sous-tâches (13.49,  $p < 0.017$ , 95 % CI [3.16, 23.82]). Ceci suggère que les étapes avec 0 sous-tâche étaient mieux réussies que les étapes avec 2 sous-tâches. Les comparaisons multiples n'ont pas révélé de différence moyenne significative entre les étapes avec 1 sous-tâche et les étapes avec 2 sous-tâches (0.79,  $p = 1.00$ , 95 % CI [-11.48, 13.06]).

Les résultats ont montré un effet significatif du Nombre de distracteurs intervenants avant de présenter le projet d'affaires sur le taux de réussite ( $F [2, 26] = 21.57, p < 0.001$ ). La taille de l'effet ( $\eta^2_{\text{partiel}} = 0.62$ ) du nombre de distracteurs était grande. En effet, des comparaisons

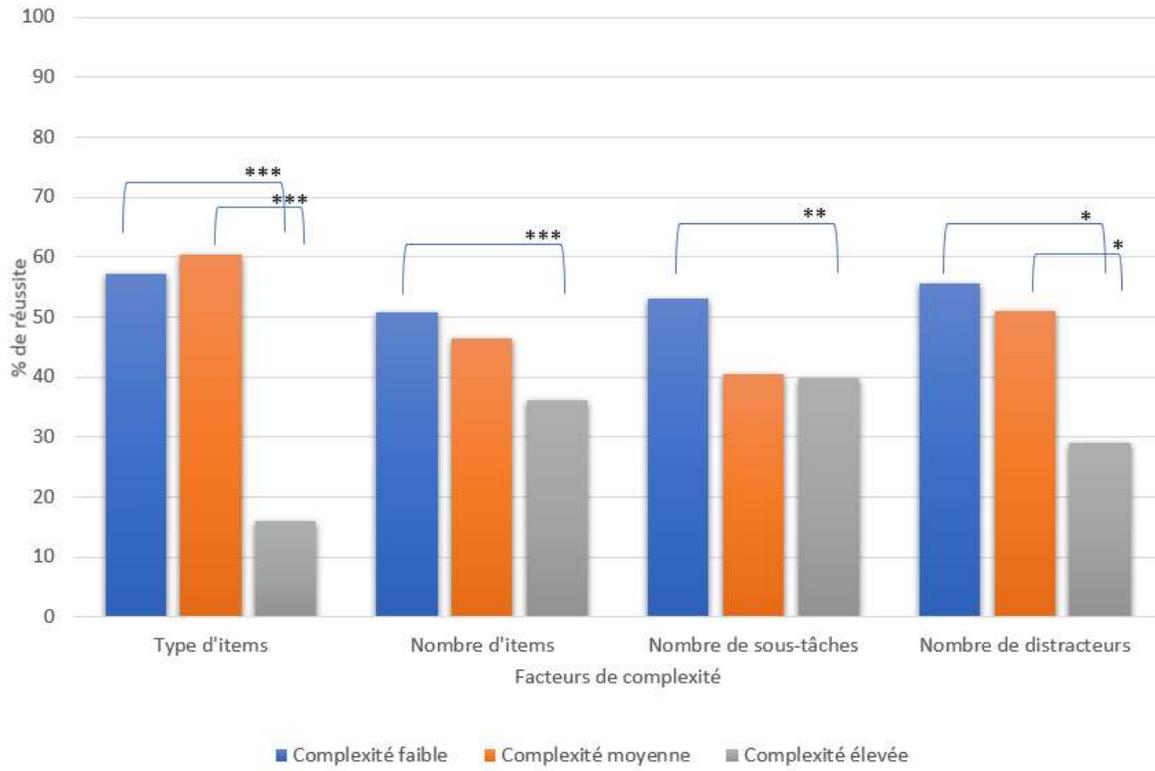
multiplées a posteriori avec la correction de Bonferroni ont révélé une différence moyenne significative entre les étapes avec aucun distracteur et les étapes avec 2 distracteurs (26.59,  $p < 0.01$ , 95 % CI [12.09, 41.08]), ainsi qu'entre les étapes avec 1 distracteur et les étapes avec 2 distracteurs (22.09,  $p < 0.01$ , 95 % CI [9.72, 34.46]). Ainsi, les étapes avec 0 ou 1 distracteur avaient un taux de réussite supérieur aux étapes avec 2 distracteurs. Ces comparaisons post-hoc n'ont pas révélé une différence moyenne significative (4.45,  $p = 0.42$ , 95 % CI [-3.35, 12.35]) entre les étapes avec 0 distracteur et les étapes avec 1 distracteur.

La Figure 8 ci-dessous permet d'illustrer de façon résumée les contrastes significatifs après corrections pour l'erreur de Type 1. Il faut rappeler que seuls les contrastes dont la probabilité se situe en dessous de 0.017 demeurent significatifs après l'application des corrections de Bonferroni.

À titre informatif, le Tableau 6 présente le taux de succès spécifique à chacune des 54 étapes en fonction des facteurs de complexité, alors que la Figure 9 illustre les taux de succès en fonction de l'ordre numérique des 54 étapes. Aucune analyse statistique n'est rapportée sur ces données, compte tenu de la petite taille de l'échantillon et de la faible puissance statistique inhérente à un aussi grand nombre de comparaisons. La Figure 10 rapporte la même information que la Figure 9, mais en ordre décroissant de niveaux du VR-WORK-M afin d'illustrer la croissance de difficulté des étapes.

**Figure 8**

*Représentation visuelle des comparaisons statistiquement significatives entre les taux de réussite moyens pour les quatre facteurs de complexité du VR-WORK-M.*



Note : \* $p < 0.017$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$  ; voir Tableau 5 pour les écart-types

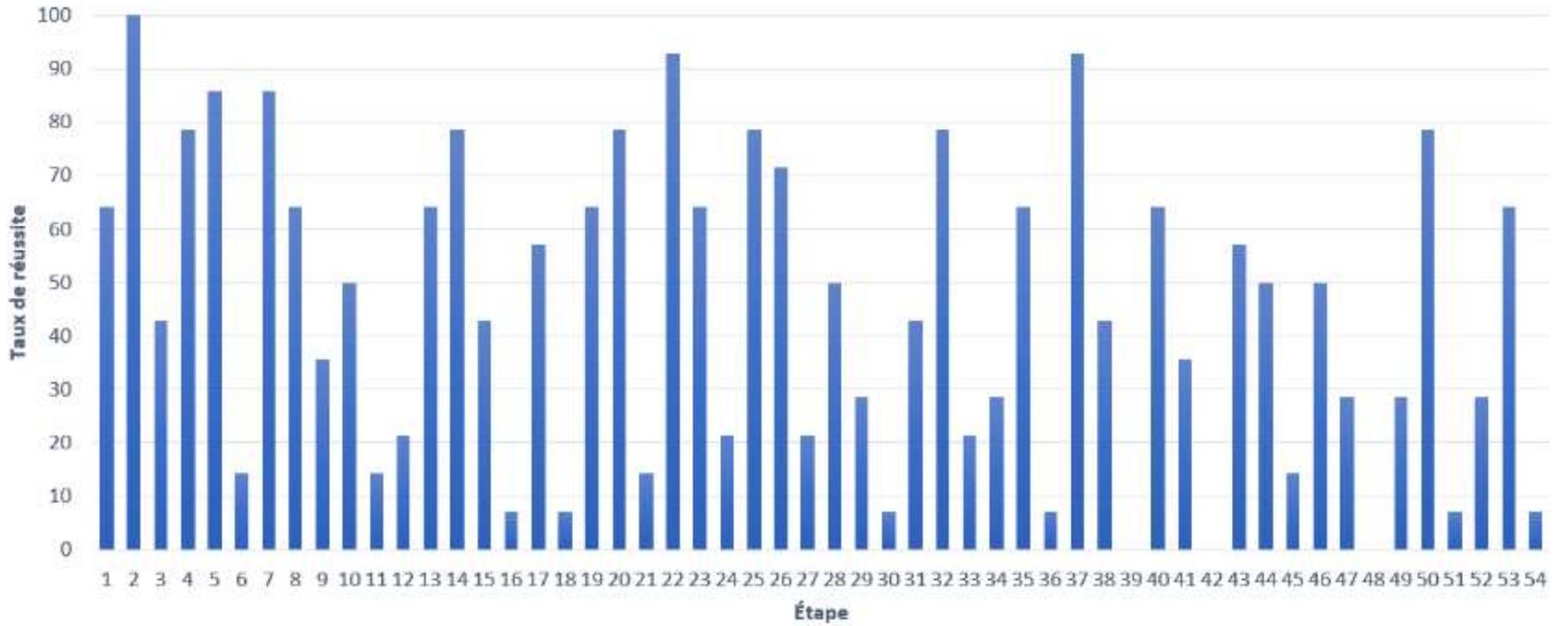
**Tableau 6**

Taux de réussite (% sur 14 participants) à chacune de 54 étapes du VR-WORK-M

	Type d'items dans la tâche de MDT				
	# de sous-tâches	# de distracteurs	Tâche de MDT : items fréquents	Tâche de MDT : items rares	Tâche de MDT : items conceptuels
Nombre d'items dans la tâche de MDT : 4 items	0	0	1 (Thème 1) <b>64.29 %</b>	2 (Thème 2) <b>100.00 %</b>	3 (Thème 3) <b>42.86 %</b>
	0	1	4 (Thème 4) <b>78.57 %</b>	5 (Thème 5) <b>85.71 %</b>	6 (Thème 6) <b>14.29 %</b>
	1	1	7 (Thème 7) <b>85.71 %</b>	8 (Thème 8) <b>64.29 %</b>	9 (Thème 9) <b>35.71 %</b>
	1	2	10 (Thème 10) <b>50.00 %</b>	11 (Thème 11) <b>14.29 %</b>	12 (Thème 12) <b>21.43 %</b>
	2	1	13 (Thème 13) <b>64.29 %</b>	14 (Thème 14) <b>78.57 %</b>	15 (Thème 15) <b>42.86 %</b>
	2	2	16 (Thème 16) <b>7.14 %</b>	17 (Thème 17) <b>57.14 %</b>	18 (Thème 18) <b>7.14 %</b>
Nombre d'items dans la tâche de MDT : 5 items	0	0	19 (Thème 1) <b>64.29 %</b>	20 (Thème 2) <b>78.57 %</b>	21 (Thème 3) <b>14.29 %</b>
	0	1	22 (Thème 4) <b>92.86 %</b>	23 (Thème 5) <b>64.29 %</b>	24 (Thème 6) <b>21.43 %</b>
	1	1	25 (Thème 7) <b>78.57 %</b>	26 (Thème 8) <b>71.43 %</b>	27 (Thème 9) <b>21.43 %</b>
	1	2	28 (Thème 10) <b>50.00 %</b>	29 (Thème 11) <b>28.57 %</b>	30 (Thème 12) <b>7.14 %</b>
	2	1	31 (Thème 13) <b>42.86 %</b>	32 (Thème 14) <b>78.57 %</b>	33 (Thème 15) <b>21.43 %</b>
	2	2	34 (Thème 16) <b>28.57 %</b>	35 (Thème 17) <b>64.29 %</b>	36 (Thème 18) <b>7.14 %</b>
Nombre d'items dans la tâche de MDT : 6 items	0	0	37 (Thème 1) <b>92.86 %</b>	38 (Thème 2) <b>42.86 %</b>	39 (Thème 3) <b>0.00 %</b>
	0	1	40 (Thème 4) <b>64.29 %</b>	41 (Thème 5) <b>35.71 %</b>	42 (Thème 6) <b>0.00 %</b>
	1	1	43 (Thème 7) <b>57.14 %</b>	44 (Thème 8) <b>50.00 %</b>	45 (Thème 9) <b>14.29 %</b>
	1	2	46 (Thème 10) <b>50.00 %</b>	47 (Thème 11) <b>28.57 %</b>	48 (Thème 12) <b>0.00 %</b>
	2	1	49 (Thème 13) <b>28.57 %</b>	50 (Thème 14) <b>78.57 %</b>	51 (Thème 15) <b>7.14 %</b>
	2	2	52 (Thème 16) <b>28.57 %</b>	53 (Thème 17) <b>64.29 %</b>	54 (Thème 18) <b>7.14 %</b>

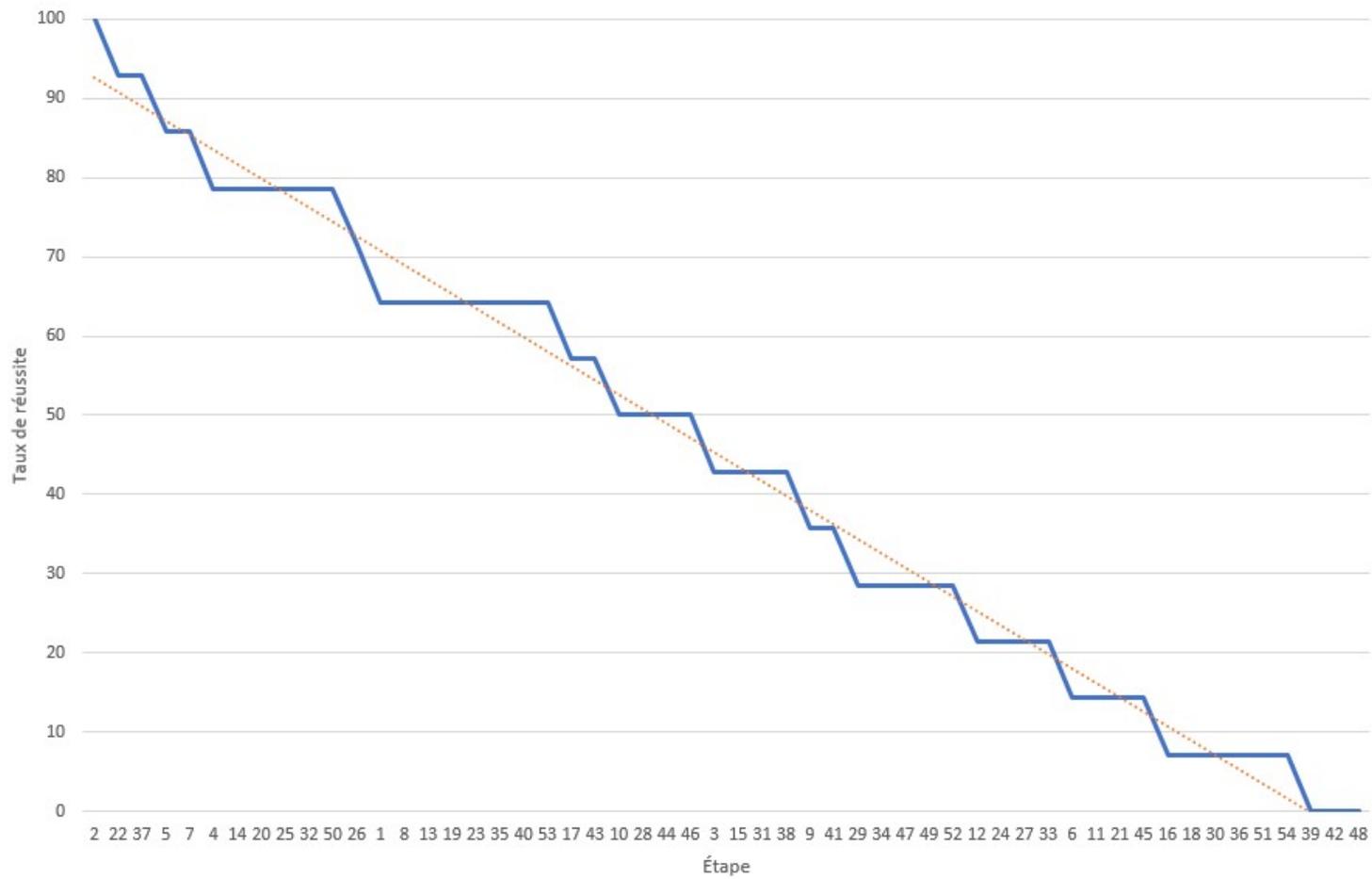
**Figure 9**

*Taux de réussite à chacune des 54 étapes du VR-WORK-M, selon l'ordre numérique des étapes (N=14).*



**Figure 10**

*Illustration des 54 étapes du VR-WORK-M en ordre décroissant de taux de réussite (N=14).*



## CHAPITRE 4 : DISCUSSION

Ce projet s'inscrit dans une démarche de conception d'un programme de remédiation en réalité virtuelle (VR-WORK-M) qui vise à améliorer la mémoire de travail (MDT) et de valider l'impact des facteurs de complexité utilisés pour créer les différentes étapes du programme. Le développement du programme repose sur les théories courantes de la MDT. La présente étude pilote documente la validation de l'effet de quatre facteurs de complexité avec des participants en santé qui ont complété chacune des étapes du programme.

La validation de ce programme de remédiation était requise pour optimiser ce dernier avant de l'utiliser chez une population vulnérable. Pour ce projet, ceci s'est traduit par l'évaluation de la difficulté de la tâche de MDT en fonction des facteurs de complexité. Il était important d'évaluer cette augmentation, car pour induire des changements dans la MDT, il faut savoir si les tâches présentent un défi pour cette fonction cognitive en incluant des étapes relativement facile et relativement difficile pour une population non-clinique.

Les résultats aux analyses décrites précédemment soutiennent les quatre hypothèses principales et montrent que, dans une population de jeunes adultes ne présentant pas de signes de problème de MDT, il y a, globalement, une augmentation de la difficulté de la tâche de MDT selon le Type d'items dans le projet d'affaires, le Nombre d'items dans le projet d'affaires, le Nombre de sous-tâches à réaliser avant de présenter le projet d'affaires, et le Nombre de distracteurs intervenant avant de présenter le projet d'affaires.

Plus spécifiquement, les données récoltées sur un échantillon relativement petit suggèrent que, pour le Type d'items dans le projet d'affaires, les items conceptuels sont plus difficiles que les items fréquents et les items rares. Pour le Nombre d'items, les étapes avec six items sont plus difficiles que les étapes avec quatre. Les étapes avec 2 sous-tâches sont plus difficiles que les

étapes avec aucune sous-tâche. Finalement, les étapes avec deux distracteurs sont plus difficiles que les étapes avec aucun ou un seul distracteur. Parmi les quatre facteurs de complexité, le Type d'items a la plus grande taille d'effet sur la difficulté de la tâche de MDT. La transition des items faciles et des items rares vers des items conceptuels semble entraîner un effet particulièrement perturbateur sur la MDT. Ceci pourrait s'expliquer par le changement de mots simples (peu importe si les mots sont fréquents ou rares dans le vocabulaire) à des phrases qui sont plus longues et compliquées. Pour les autres facteurs de complexité, certains effets n'atteignent pas le taux de signification statistique en raison d'un nombre de participants réduit, mais globalement on observe des résultats tangibles. Le Nombre d'items a une taille d'effet moins importante que le Type d'items et le Nombre de distracteurs, mais dans l'ensemble les résultats semblent représenter une augmentation de la charge cognitive progressive en fonction de l'augmentation du nombre d'items. En ce qui a trait au Nombre de sous-tâches, c'est le facteur ayant la plus petite taille d'effet et la tâche de MDT semble devenir plus difficile dès qu'une tâche concurrente est ajoutée. La différence entre aucune et une seule sous-tâche n'est pas statistiquement significative après correction pour le nombre de comparaisons, mais la différence s'avère tout de même non-négligeable. Alors que la différence entre une et deux sous-tâches paraît presque nulle. Ceci peut représenter la transition d'une épreuve qui ressemble plus à un empan simple vers une épreuve plus similaire à un empan complexe. Finalement, le Nombre de distracteurs devient particulièrement perturbateur lorsque deux distracteurs surviennent pour détourner l'attention, alors que le passage d'aucun à un distracteur a un effet très minime. Ces résultats sont globalement compatibles avec les recherches menées sur la boucle phonologique et l'administrateur central du modèle de Baddeley, qui permettent de prédire qu'une augmentation du nombre d'items, l'ajout de distracteurs ou de sous-tâches et l'augmentation de la longueur des items (ici représenté par des mots vs des phrases)

entraîneraient une hausse de la difficulté de la tâche. Par contre, l'effet de fréquence n'a pas été observé ici, possiblement en raison des projets d'affaires qui ont fourni un contexte pour le rappel.

Les données obtenues offrent déjà des informations en ce qui a trait à la validation de divers facteurs de complexité qui peuvent être utilisés pour augmenter la difficulté d'une tâche de MDT. Ces résultats présentent un grand intérêt puisque la plupart des programmes d'entraînement de la MDT n'utilisent pas la réalité virtuelle et manipulent seulement le nombre d'items à garder en mémoire pour augmenter la difficulté. En validant d'autres facteurs pouvant augmenter la difficulté d'une tâche de MDT, la présente étude ouvre de nouvelles voies à explorer. La MDT constitue une fonction cognitive essentielle dans notre quotidien, car elle régule plusieurs autres fonctions nécessaires pour l'interaction consciente avec le monde. Ainsi, les déficits de la MDT peuvent entraîner des handicaps importants (Ricker, AuBuchon, & Cowan, 2010). La MDT peut être affectée dans les maladies neurodégénératives (maladie de Parkinson [Budson & Price, 2005; Paris et al., 2011] et maladie d'Alzheimer [Budson & Price, 2005; Cipriani, Bianchetti, & Trabucchi, 2006]), suite à des lésions cérébrales acquises (accident cérébrovasculaire [Budson & Price, 2005; Westerberg et al., 2007], traumatisme craniocérébral [Budson & Price, 2005; Vallat-Azouvi, Pradat-Diehl, & Azouvi, 2009], sclérose en plaques [Budson & Price, 2005; Vogt et al., 2009]), le TDAH (Budson & Price, 2005 ; Klingberg et al., 2005) et la schizophrénie (Bell, Bryson, & Wexler, 2003 ; Budson & Price, 2005). Ainsi, un programme qui manipule quatre facteurs de complexité devrait être validé explicitement auprès de chacune de ces populations cliniques. Plusieurs études ont montré la possibilité de remédier la MDT dans ces populations, mais avec des programmes qui manipulent seulement le nombre d'items à retenir (Bell et al., 2003 ; Cipriani et al., 2006 ; Klingberg et al., 2005 ; Paris et al., 2011 ; Vallat-Azouvi et al., 2009 ; Vogt et al., 2009 ;

Westerberg et al., 2007). Le potentiel de généralisation des résultats de la remédiation à divers contextes devrait s'en voir amélioré.

Ce projet va également participer à l'avancement de la recherche sur la remédiation de la MDT. L'efficacité de la remédiation des fonctions cognitives est un domaine qui commence à peine à se développer. La création d'un programme spécifique à la remédiation de la MDT permettrait, avec des études futures, de contribuer à ce domaine. Il devrait devenir possible d'intervenir de façon ciblée sur les diverses composantes de la mémoire de travail proposées par Baddeley (2003, 2012), dont le calepin visuospatial (par le recours à des défis visuels ou impliquant des déplacements dans l'environnement virtuel), le tampon épisodique (par l'analyse des interactions entre les facteurs de complexité), la boucle phonologique (par le recours à des défis verbaux), ainsi que l'administrateur central (par l'analyse des distracteurs et des sous-tâches, ainsi que par l'analyse de défis de niveaux faibles ou moyens mais nécessitant l'intégration des différents facteurs de complexité).

De plus, ce projet contribue à l'avancement de l'utilisation de la réalité virtuelle pour la remédiation des fonctions cognitives. La réalité virtuelle devient de plus en plus utilisée en raison de son potentiel de validité écologique et plus ludique que des tâches papier-crayon. A notre connaissance, aucun programme en réalité virtuelle n'est dédié uniquement à la remédiation de la MDT. Donc, ce projet permet de contribuer à ce domaine en fournissant un nouvel outil prometteur. Rappelons toutefois que, même si les hypothèses principales ont été confirmées, les sous-hypothèses proposées n'ont pas toutes bénéficiées d'un appui statistique. Il sera important de poursuivre les démarches de validation auprès d'échantillons cliniques de grande envergure pour confirmer ces résultats et analyser les interactions entre les facteurs de complexité.

## **Forces de l'étude**

La validité interne de ce projet a bien été préservée; les variables indépendantes sont manipulées séparément afin de documenter l'impact sur le taux de réussite. Il s'agit aussi d'un devis intra-sujets, ce qui exclut la possibilité que les résultats observés soient dus à des différences intergroupes préalables au projet.

La validation du programme a été effectuée de façon à réduire les effets de pratique et de fatigue. Premièrement, les items à garder en MDT reviennent à quelques reprises à travers le programme, et donc les participants risquaient d'encoder les items en mémoire à long terme. Il risquait aussi d'y avoir un effet de fatigue, ainsi qu'un impact de l'attention soutenue, car les participants ont réalisé toutes les étapes en une séance. Pour contrôler pour ces effets, nous avons administré les étapes aléatoirement. En faisant ceci, les étapes avec les mêmes items à garder en MDT ne sont pas survenues une après l'autre, ce qui serait le cas dans un programme de remédiation. De plus, l'ordre général des étapes changeait pour chaque participant, donc ce n'était pas toujours les mêmes étapes qui arrivaient soit au début ou à la fin de la séance. Bref, les effets de pratique et de fatigue ont été distribués parmi les participants pour réduire leur impact.

## **Limites de l'étude**

Premièrement, le nombre de participants, déjà limité mais réduit en raison de la pandémie mondiale de COVID-19, représente une limite importante. Compte tenu des tailles d'effets observées, on peut conclure que la présence de six participants de plus aurait permis d'atteindre des seuils de significativité statistique plus confortables et résistant bien aux corrections de Bonferroni, mais n'aurait modifié qu'une seule conclusion (Nombre de sous-tâche à 0 versus 1 sous-tâche aurait probablement été statistiquement significative après la correction pour l'erreur de Type 1). Pour effectuer l'ensemble des analyses possibles avec le VR-WORK-M, dont

notamment les interactions entre les facteurs de complexité et l'analyse comparative de chaque niveau, un échantillon de plusieurs centaines de participants aurait été requis. De plus, le recours à des étudiants pose certaines limites à la validité externe d'un instrument visant une population ayant des troubles cliniques de MDT. Par contre, cette étude représentait une étape préalable nécessaire pour la création d'un nouveau programme de remédiation. Il fallait documenter la présence d'un réel défi pour la MDT, et ce sans avoir à impliquer des populations vulnérables.

Finalement, en essayant de créer une tâche de MDT plus écologique, certains items dans les projets d'affaires ont perdu leur pureté en termes de mécanismes verbaux. Dans les tâches de MDT traditionnelles, on ne demande généralement la rétention que de mots, de chiffres ou de lettres. Par contre, il serait peu réaliste de demander aux usagers du VR-WORK-M de simplement dire des mots plutôt que de devoir parler d'un projet d'affaires. Ainsi, nous avons créé des projets d'affaires où les mots ou les concepts à retenir s'inscrivent à l'intérieur d'une phrase, engendrant ainsi un contexte pour le rappel des items, ce qui pourrait aussi expliquer l'absence de l'effet de fréquence dans les résultats. Par contre, nous avons estimé que ce fût une concession raisonnable pour avoir une tâche de MDT plus réaliste, et nos résultats suggèrent qu'on peut tout de même augmenter la charge cognitive avec les projets d'affaires tels qu'ils sont.

### **Suggestions pour améliorer le programme VR-WORK-M**

Le programme VR-WORK-M en soi présente plusieurs avantages. Premièrement, nous avons basé le programme sur des théories courantes de la MDT et donc, ce programme devrait correspondre aux constituantes de cette fonction très importante. De plus, au lieu de simplement manipuler le nombre d'items à retenir, le programme VR-WORK-M introduit trois autres facteurs de complexité. Par contre, les interactions entre ces facteurs ont conduit à des résultats surprenants, alors que les taux de réussite n'ont pas décliné dans une séquence bien ordonnée (voir Tableau 6).

Alors que, dans son ensemble, le programme a tendance à devenir plus difficile, il y a trop de hauts et de bas pour être considéré comme une progression graduelle de la difficulté (voir Figures 9 et 10). Bien entendu, le profil de résultat pourrait différer avec un échantillon beaucoup plus grand. Dans l'avenir, il sera important de planifier dans quel ordre le programme de remédiation sera appliqué, c'est-à-dire en ordre d'étapes ou sur la base d'un facteur de complexité plutôt qu'un autre. Peut-être qu'il deviendra possible d'établir cet ordre sur des bases cliniques, en ciblant les forces spécifiques des utilisateurs et en graduant les autres facteurs de complexité tout en changeant les thèmes pour éviter la monotonie durant le programme de remédiation.

De plus, il serait bien de considérer ne pas répéter de thèmes et introduire des versions alternatives pour chaque étape. Ceci est particulièrement important quand on considère les taux de réussite des étapes plus difficiles, et ce, même auprès d'une population en santé cognitive. On peut supposer qu'en progressant dans le programme, les utilisateurs aient besoin de répéter plusieurs fois certaines étapes. Par contre, il demeure pertinent de maintenir ces étapes plus difficiles pour les utilisateurs avec des déficits plus légers qui pourraient progresser rapidement et nécessiter une marge de manœuvre pour continuer à repousser leurs limites cognitives. Il peut aussi s'avérer utile de considérer la possibilité de conserver certaines étapes, pour le moment peu discriminantes, afin d'en faire des versions alternatives. Étant donné l'absence de différence statistiquement significative entre les taux de réussite des étapes avec des items fréquents et celles avec des items rares, les étapes avec des items rares pourraient déjà être envisagées comme versions alternatives si le phénomène se reproduit dans les prochaines collectes de données. Cela donnerait l'occasion aux utilisateurs de refaire une étape manquée, sans pour autant répéter le même thème. De plus, il serait pertinent, lors des répétitions d'étape, de varier la nature et l'ordre des distracteurs pour réduire la prédictibilité et éviter une diminution de la charge cognitive. Quand cela serait fait, un

autre projet de validation pourrait être effectué avec plus de participants pour mieux documenter les taux de réussite de chaque étape, et leurs alternatives, pour pouvoir identifier un ordre croissant de difficulté qui tiendrait compte de quatre facteurs de complexité et leurs interactions. De plus, il serait pertinent de substituer le mot « pâtisserie » dans le thème 1 par une autre (par exemple, poissonnerie), ou remplacer ce thème complètement pour réduire l'impact culturel de ce terme.

Il serait également intéressant d'éventuellement introduire un système de reconnaissance vocale au programme, pour permettre aux utilisateurs futurs d'utiliser le programme sans intervenant à côté pour lancer les étapes.

### **Études futures**

En plus des suggestions pour bonifier le programme, il est possible de proposer un programme de recherche à plus long terme afin de s'assurer que le VR-WORK-M puisse améliorer la MDT chez des participants cliniques et non-cliniques. Notamment, le programme doit être mis à l'épreuve chez une population clinique, avec comparaison à un groupe contrôle. Pour vérifier la remédiation de la MDT, une évaluation neuropsychologique pourrait être administrée avant et après l'administration du programme. De plus, la neuroimagerie pourrait être utilisée pour examiner les changements dans le réseau cognitif qui sous-tend la MDT. Ces études permettraient non seulement de valider le VR-WORK-M, mais aussi de contribuer à la recherche sur la remédiation de la MDT.

Ensuite, des études futures pourraient comparer l'efficacité du VR-WORK-M avec d'autres tâches de remédiation de MDT couramment utilisées. Ceci permettrait de documenter et contraster l'utilité de la réalité virtuelle dans la remédiation des fonctions neuropsychologiques avec les outils actuellement utilisés.

Enfin, la possibilité d'utiliser le programme pour travailler d'autres fonctions cognitives pourrait être considérée. Par exemple, en mettant certains mots cibles dans le projet d'affaires, on pourrait utiliser le programme pour une population dysphasique.

En guise de conclusion, rappelons que cet essai doctoral visait à valider l'impact de divers facteurs de complexité sur l'augmentation de la difficulté d'une tâche d'entraînement de la MDT dans un environnement virtuel. Les résultats suggèrent qu'il y a une augmentation de la difficulté selon les quatre facteurs de complexité proposés. Cela ouvre la voie à un programme de remédiation qui pourrait mettre au défi la mémoire de travail des utilisateurs de façon plus variée que ce qui existe pour le moment. De plus, cette étude pilote nous a permis d'envisager des suggestions pour bonifier le VR-WORK-M.

## **RÉFÉRENCES**

- Alloway, T. P., Bibile, V., & Lau, G. (2013). Computerized working memory training: Can it lead to gains in cognitive skills in students? *Computers in Human Behavior*, 29(3), 632–638. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2012.10.023>
- Ansado, J., Chasen, C., Bouchard, S., Iakimova, G., & Northoff, G. (2020). How brain imaging provides predictive biomarkers for therapeutic success in the context of virtual reality cognitive training. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, S0149-7634(20), 30421-8. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.05.018>
- Arenth, P. M., Russell, K. C., Scanlon, J. M., Kessler, L. J., & Ricker, J. H. (2014). Corpus Callosum Integrity and Neuropsychological Performance After Traumatic Brain Injury. *Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 29(2), E1–E10. <https://doi.org/10.1097/htr.0b013e318289ede5>
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417–423. [https://doi.org/10.1016/s1364-6613\(00\)01538-2](https://doi.org/10.1016/s1364-6613(00)01538-2)
- Baddeley, A. (2002). Is Working Memory Still Working? *European Psychologist*, 7(2), 85–97. <https://doi.org/10.1027//1016-9040.7.2.85>
- Baddeley, A. (2003). Working Memory: Looking Back and Looking Forward. *Nature Reviews Neuroscience*, 4(10), 829–839. <https://doi.org/10.1038/nrn1201>
- Baddeley, A. (2012). Working Memory: Theories, Models, and Controversies. *Annual Review of Psychology*, 63(1), 1–29. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100422>
- Baddeley, A., Allen, R. J., & Hitch, G. J. (2010). Investigating the episodic buffer. *Psychologica Belgica*, 50(3–4), 223–243. <https://doi.org/10.5334/pb-50-3-4-223>
- Baddeley, A., Chincotta, D., Stafford, L., & Turk, D. (2002). Is the word length effect in STM entirely attributable to output delay? Evidence from serial recognition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 55(2), 353–369. <https://doi.org/10.1080/02724980143000523>
- Baddeley, A. D., Hitch, G. J., & Quinlan, P. T. (2018). Is the phonological similarity effect in working memory due to proactive interference? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 44(8), 1312–1316. <https://doi.org/10.1037/xlm0000509>
- Banville, F., Couture, J. F., Verhulst, E., Besnard, J., Richard, P., & Allain, P. (2017). *Using Virtual Reality to Assess the Elderly: The Impact of Human-Computer Interfaces on Cognition*. [Paper presentation]. International Conference on Human Interface and the Management of Information: Supporting Learning, Decision-Making and Collaboration, 113–123. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-58524-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58524-6_10)

- Banville, F., Nolin, P., Lalonde, S., Henry, M., Dery, M.-P., & Villemure, R. (2010). Multitasking and Prospective Memory: Can Virtual Reality be Useful for Diagnosis? *Behavioural Neurology, 23*(4), 209–211. <https://doi.org/10.1155/2010/320707>
- Banville, F., Nolin, P., Rosinvil, T., Verhulst, E., & Allain, P. (2019). Assessment and Rehabilitation after Traumatic Brain Injury Using Virtual Reality: A Systematic Review and Discussion Concerning Human-Computer Interactions. In *Virtual Reality for Psychological and Neurocognitive Interventions* (pp. 327–360). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9482-3\\_15](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9482-3_15)
- Barrouillet, P., Bernardin, S., & Camos, V. (2004). Time Constraints and Resource Sharing in Adults' Working Memory Spans. *Journal of Experimental Psychology: General, 133*(1), 83–100. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.133.1.83>
- Barrouillet, P., Bernardin, S., Portrat, S., Vergauwe, E., & Camos, V. (2007). Time and cognitive load in working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 33*(3), 570–585. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.33.3.570>
- Barrouillet, P., Gavens, N., Vergauwe, E., Gaillard, V., & Camos, V. (2009). Working memory span development: A time-based resource-sharing model account. *Developmental Psychology, 45*(2), 477–490. <https://doi.org/10.1037/a0014615>
- Bell, M., Bryson, G., & Wexler, B. E. (2003). Cognitive remediation of working memory deficits: durability of training effects in severely impaired and less severely impaired schizophrenia. *Acta Psychiatrica Scandinavica, 108*(2), 101–109. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0447.2003.00090.x>
- Budson, A.E., & Price, B.H. (2005). Memory: Clinical Disorders. In *Encyclopedia of Life Sciences*. Retrieved from [http://www.ufrgs.br/ppgneuro/artigos/MMRdisorders\\_ELS2003.pdf](http://www.ufrgs.br/ppgneuro/artigos/MMRdisorders_ELS2003.pdf)
- Caglio, M., Latini-Corazzini, L., D'Agata, F., Cauda, F., Sacco, K., Monteverdi, S., Zettin, M., Duca, S., & Geminiani, G. (2012). Virtual navigation for memory rehabilitation in a traumatic brain injured patient. *Neurocase, 18*(2), 123–131. <https://doi.org/10.1080/13554794.2011.568499>
- Camos, V., Lagner, P., & Barrouillet, P. (2009). Two maintenance mechanisms of verbal information in working memory. *Journal of Memory and Language, 61*(3), 457–469. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2009.06.002>
- Cho, B.-H., Kim, S., Shin, D. I., Lee, J. H., Min Lee, S., Young Kim, I., & Kim, S. I. (2004). Neurofeedback Training with Virtual Reality for Inattention and Impulsiveness. *CyberPsychology & Behavior, 7*(5), 519–526. <https://doi.org/10.1089/cpb.2004.7.519>
- Christiansen, C., Abreu, B., Ottenbacher, K., Huffman, K., Masel, B., & Culpepper, R. (1998). Task performance in virtual environments used for cognitive rehabilitation after traumatic

- brain injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 79(8), 888–892.  
[https://doi.org/10.1016/s0003-9993\(98\)90083-1](https://doi.org/10.1016/s0003-9993(98)90083-1)
- Cicerone, K. D. (2002). Remediation of “working attention” in mild traumatic brain injury. *Brain Injury*, 16(3), 185–195. <https://doi.org/10.1080/02699050110103959>
- Cipriani, G., Bianchetti, A., & Trabucchi, M. (2006). Outcomes of a computer-based cognitive rehabilitation program on Alzheimer’s disease patients compared with those on patients affected by mild cognitive impairment. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 43(3), 327–335. <https://doi.org/10.1016/j.archger.2005.12.003>
- Cowan, N. (1999). An embedded-processes model of working memory. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 62–101). Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139174909.006>
- Cowan, N. (2017). The many faces of working memory and short-term storage. *Psychonomic Bulletin & Review*, 24(4), 1158–1170. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1191-6>
- Dahlin, E., Nyberg, L., Bäckman, L., & Neely, A. S. (2008). Plasticity of executive functioning in young and older adults: Immediate training gains, transfer, and long-term maintenance. *Psychology and Aging*, 23(4), 720–730. <https://doi.org/10.1037/a0014296>
- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1), 135–168.  
<https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Engle, R. W., Tuholski, S. W., Laughlin, J. E., & Conway, A. R. A. (1999). Working memory, short-term memory, and general fluid intelligence: A latent-variable approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, 128(3), 309–331. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.128.3.309>
- Fuchs, P., Moreau, G., Burkhardt, J., & Coquillart, S. (2006). Introduction à la réalité virtuelle. In *Le traité de la réalité virtuelle: Vol. 2: L'interfaçage, l'immersion et l'interaction en environnement virtuel* (p. 7). Presses des Mines.
- Gamito, P., Oliveira, J., Coelho, C., Morais, D., Lopes, P., Pacheco, J., Brito, R., Soares, F., Santos, N., & Barata, A. F. (2017). Cognitive training on stroke patients via virtual reality-based serious games. *Disability and Rehabilitation*, 39(4), 385–388.  
<https://doi.org/10.3109/09638288.2014.934925>
- Gazzaley, A., & Nobre, A. C. (2012). Top-down modulation: bridging selective attention and working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(2), 129–135.  
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.11.014>
- Geurten, M., Vincent, E., Van der Linden, M., Coyette, F., & Meulemans, T. (2016). Supplemental Material for Working Memory Assessment: Construct Validity of the

- Brown-Peterson Test. *Canadian Journal of Behavioural Science / Revue Canadienne Des Sciences Du Comportement*, 48(4), 328–336. <https://doi.org/10.1037/cbs0000057.supp>
- Giedd, J. N., Rumsey, J. M., Castellanos, F. X., Rajapakse, J. C., Kaysen, D., Catherine Vaituzis, A., Vauss, Y. C., Hamburger, S. D., & Rapoport, J. L. (1996). A quantitative MRI study of the corpus callosum in children and adolescents. *Developmental Brain Research*, 91(2), 274–280. [https://doi.org/10.1016/0165-3806\(95\)00193-x](https://doi.org/10.1016/0165-3806(95)00193-x)
- Gruszka, A., & Orzechowski, J. ł. (2016). Meta-analysis of the research impact of Baddeley’s multicomponent working memory model and Cowan’s embedded-processes model of working memory: A bibliometric mapping approach. *Polish Psychological Bulletin*, 47(1), 1–11. <https://doi.org/10.1515/ppb-2016-0001>
- Guitard, D., Saint-Aubin, J., Tehan, G., & Tolan, A. (2017). Does neighborhood size really cause the word length effect? *Memory & Cognition*, 46(2), 244–260. <https://doi.org/10.3758/s13421-017-0761-9>
- Hanley, J. R., & Bakopoulou, E. (2003). Irrelevant speech, articulatory suppression, and phonological similarity: A test of the phonological loop model and the feature model. *Psychonomic Bulletin & Review*, 10(2), 435–444. <https://doi.org/10.3758/bf03196503>
- Hulme, C., Roodenrys, S., Schweickert, R., Brown, G. D. A., Martin, S., & Stuart, G. (1997). Word-frequency effects on short-term memory tasks: Evidence for a redintegration process in immediate serial recall. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 23(5), 1217–1232. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.23.5.1217>
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Perrig, W. J. (2008). Improving fluid intelligence with training on working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(19), 6829–6833. <https://doi.org/10.1073/pnas.0801268105>
- Kennedy, K. M., & Raz, N. (2009). Aging white matter and cognition: Differential effects of regional variations in diffusion properties on memory, executive functions, and speed. *Neuropsychologia*, 47(3), 916–927. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.01.001>
- Klingberg, T. (2010). Training and plasticity of working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(7), 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.05.002>
- Klingberg, T., Fernell, E., Olesen, P. J., Johnson, M., Gustafsson, P., Dahlström, K., Gillberg, C. G., Forsberg, H., & Westerberg, H. (2005). Computerized Training of Working Memory in Children With ADHD-A Randomized, Controlled Trial. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 44(2), 177–186. <https://doi.org/10.1097/00004583-200502000-00010>

- Klingberg, T., Forssberg, H., & Westerberg, H. (2002). Training of Working Memory in Children With ADHD. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 24(6), 781–791. <https://doi.org/10.1076/jcen.24.6.781.8395>
- Larousse. Rédintégration. In *Larousse.fr*. Retrieved March 26, 2021, from <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/r%C3%A9dint%C3%A9gration/67325>
- Levin, M. F. (2011). Can virtual reality offer enriched environments for rehabilitation? *Expert Review of Neurotherapeutics*, 11(2), 153–155. <https://doi.org/10.1586/ern.10.201>
- Meiser, T., & Klauer, K. C. (1999). Working memory and changing-state hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 25(5), 1272–1299. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.25.5.1272>
- Melby-Lervåg, M., Redick, T. S., & Hulme, C. (2016). Working Memory Training Does Not Improve Performance on Measures of Intelligence or Other Measures of “Far Transfer.” *Perspectives on Psychological Science*, 11(4), 512–534. <https://doi.org/10.1177/1745691616635612>
- Miller, G. A., Galanter, E., & Pribram, K. H. (1960). Plans and the structure of behavior. *The Journal of Comparative Neurology*, 115(2), 217. <https://doi.org/10.1002/cne.901150208>
- Mora, G. (2011). *Les mécanismes de maintien de l'information verbale en mémoire de travail*. [Thèse doctoral, Université de Bourgogne]. Éditions Universitaires Européennes.
- Morrison, A. B., & Chein, J. M. (2011). Does working memory training work? The promise and challenges of enhancing cognition by training working memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(1), 46–60. <https://doi.org/10.3758/s13423-010-0034-0>
- Neath, I. (2000). Modeling the effects of irrelevant speech on memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 7(3), 403–423. <https://doi.org/10.3758/bf03214356>
- Neath, I., & Brown, G. D. A. (2012). Arguments Against Memory Trace Decay: A SIMPLE Account of Baddeley and Scott. *Frontiers in Psychology*, 3(35), 1–3. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00035>
- New, B., Pallier, C., Ferrand, L., & Matos, R. (2001). Une base de données lexicales du français contemporain sur internet. Retrieved September, 2017, from <http://www.lexique.org/>
- Niogi, S. N., & Mukherjee, P. (2010). Diffusion Tensor Imaging of Mild Traumatic Brain Injury. *Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 25(4), 241–255. <https://doi.org/10.1097/htr.0b013e3181e52c2a>
- Nolin, P., Besnard, J., Allain, P., & Banville, F. (2019). Assessment and Rehabilitation Using Virtual Reality after Stroke: A Literature Review. In *Virtual Reality for Psychological and Neurocognitive Interventions* (pp. 307–326). Springer Publishing.

- Olesen, P. J., Westerberg, H., & Klingberg, T. (2004). Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature Neuroscience*, 7(1), 75–79. <https://doi.org/10.1038/nn1165>
- París, A. P., Saleta, H. G., de la Cruz Crespo Maraver, M., Silvestre, E., Freixa, M. G., Torrellas, C. P., Pont, S. A., Nadal, M. F., Garcia, S. A., Bartolomé, M. V. P., Fernández, V. L., & Bayés, À. R. (2011). Blind randomized controlled study of the efficacy of cognitive training in Parkinson's disease. *Movement Disorders*, 26(7), 1251–1258. <https://doi.org/10.1002/mds.23688>
- Puma, S., Matton, N., Paubel, P.-V., & Tricot, A. (2018). Cognitive Load Theory and Time Considerations: Using the Time-Based Resource Sharing Model. *Educational Psychology Review*, 30(3), 1199–1214. <https://doi.org/10.1007/s10648-018-9438-6>
- Ricker, T. J., AuBuchon, A. M., & Cowan, N. (2010). Working memory. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 1(4), 573–585. <https://doi.org/10.1002/wcs.50>
- Ritchie, G., Tolan, G. A., & Tehan, G. (2015). Redintegration, task difficulty, and immediate serial recall tasks. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 69(1), 54–63. <https://doi.org/10.1037/cep0000031>
- Rizzo, A. A., Schultheis, M., Kerns, K. A., & Mateer, C. (2004). Analysis of assets for virtual reality applications in neuropsychology. *Neuropsychological Rehabilitation*, 14(1–2), 207–239. <https://doi.org/10.1080/09602010343000183>
- Rottschy, C., Langner, R., Dogan, I., Reetz, K., Laird, A. R., Schulz, J. B., Fox, P. T., & Eickhoff, S. B. (2012). Modelling neural correlates of working memory: A coordinate-based meta-analysis. *NeuroImage*, 60(1), 830–846. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.11.050>
- Ruchkin, D. S., Johnson, R., Grafman, J., Canoune, H., & Ritter, W. (1992). Distinctions and similarities among working memory processes: an event-related potential study. *Cognitive Brain Research*, 1(1), 53–66. [https://doi.org/10.1016/0926-6410\(92\)90005-c](https://doi.org/10.1016/0926-6410(92)90005-c)
- Salminen, T., Mårtensson, J., Schubert, T., & Kühn, S. (2016). Increased integrity of white matter pathways after dual n-back training. *NeuroImage*, 133, 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.03.028>
- Schmiedek, F., Hildebrandt, A., Lövdén, M., Wilhelm, O., & Lindenberger, U. (2009). Complex span versus updating tasks of working memory: The gap is not that deep. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35(4), 1089–1096. <https://doi.org/10.1037/a0015730>
- Schultheis, M. T., & Rizzo, A. A. (2001). The application of virtual reality technology in rehabilitation. *Rehabilitation Psychology*, 46(3), 296–311. <https://doi.org/10.1037/0090-5550.46.3.296>

- Seron, X., & Van der Linden, M. (2016). *Traité de neuropsychologie clinique de l'adulte: Tome 2-Rééducation*. De Boeck Supérieur.
- Shipstead, Z., Redick, T. S., & Engle, R. W. (2010). Does working memory training generalize? *Psychologica Belgica*, *50*(3–4), 245–276. <https://doi.org/10.5334/pb-50-3-4-245>
- Sterr, A., Herron, K. A., Hayward, C., & Montaldi, D. (2006). Are mild head injuries as mild as we think? Neurobehavioral concomitants of chronic post-concussion syndrome. *BMC Neurology*, *6*(1), 7–33. <https://doi.org/10.1186/1471-2377-6-7>
- Stone, J. M., & Towse, J. N. (2015). A Working Memory Test Battery: Java-Based Collection of Seven Working Memory Tasks. *Journal of Open Research Software*, *3*(1), e5–e14. <https://doi.org/10.5334/jors.br>
- Takeuchi, H., Sekiguchi, A., Taki, Y., Yokoyama, S., Yomogida, Y., Komuro, N., Yamanouchi, T., Suzuki, S., & Kawashima, R. (2010). Training of Working Memory Impacts Structural Connectivity. *Journal of Neuroscience*, *30*(9), 3297–3303. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.4611-09.2010>
- Tam, H., Jarrold, C., Baddeley, A. D., & Sabatos-DeVito, M. (2010). The development of memory maintenance: Children's use of phonological rehearsal and attentional refreshment in working memory tasks. *Journal of Experimental Child Psychology*, *107*(3), 306–324. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.05.006>
- Thorell, L. B., Lindqvist, S., Bergman Nutley, S., Bohlin, G., & Klingberg, T. (2009). Training and transfer effects of executive functions in preschool children. *Developmental Science*, *12*(1), 106–113. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00745.x>
- Turner, J. E., Henry, L. A., Smith, P. T., & Brown, P. A. (2004). Redintegration and lexicality effects in children: Do they depend upon the demands of the memory task? *Memory & Cognition*, *32*(3), 501–510. <https://doi.org/10.3758/bf03195842>
- Vallat-Azouvi, C., Pradat-Diehl, P., & Azouvi, P. (2009). Rehabilitation of the central executive of working memory after severe traumatic brain injury: Two single-case studies. *Brain Injury*, *23*(6), 585–594. <https://doi.org/10.1080/02699050902970711>
- Verhaeghen, P., Cerella, J., & Basak, C. (2004). A Working Memory Workout: How to Expand the Focus of Serial Attention From One to Four Items in 10 Hours or Less. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *30*(6), 1322–1337. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.30.6.1322>
- Vogt, A., Kappos, L., Calabrese, P., Stöcklin, M., Gschwind, L., Opwis, K., & Penner, I.-K. (2009). Working memory training in patients with multiple sclerosis – comparison of two different training schedules. *Restorative Neurology and Neuroscience*, *27*(3), 225–235. <https://doi.org/10.3233/rnn-2009-0473>

- von Bastian, C. C., & Oberauer, K. (2013). Effects and mechanisms of working memory training: a review. *Psychological Research*, 78(6), 803–820. <https://doi.org/10.1007/s00426-013-0524-6>
- Wang, T., Ren, X., Li, X., & Schweizer, K. (2015). The modeling of temporary storage and its effect on fluid intelligence: Evidence from both Brown–Peterson and complex span tasks. *Intelligence*, 49, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2015.01.002>
- Weiss, P. L., Kizony, R., Feintuch, U., & Katz, N. (2006). Virtual reality in neurorehabilitation. In *Textbook of Neural Repair and Rehabilitation* (pp. 182–197). Cambridge University Press.
- Westerberg, H., Jacobaeus, H., Hirvikoski, T., Clevberger, P., Östenson, M.-L., Bartfai, A., & Klingberg, T. (2007). Computerized working memory training after stroke—A pilot study. *Brain Injury*, 21(1), 21–29. <https://doi.org/10.1080/02699050601148726>
- Zahr, N. M., Rohlfing, T., Pfefferbaum, A., & Sullivan, E. V. (2009). Problem solving, working memory, and motor correlates of association and commissural fiber bundles in normal aging: A quantitative fiber tracking study. *NeuroImage*, 44(3), 1050–1062. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.09.046>

## **ANNEXES**

## Annexe A : Questionnaire de renseignements généraux

---

Identification : \_\_\_\_\_

Date : \_\_\_\_\_

*Les renseignements fournis dans ce questionnaire seront gardés strictement confidentiels. Seuls les expérimentateurs y auront accès.*

---

---

Le participant a consenti verbalement à répondre aux différentes questions suivantes :

Nom : \_\_\_\_\_

Courriel pour vous joindre : \_\_\_\_\_

Adresse : \_\_\_\_\_

Numéro de téléphone cellulaire: \_\_\_\_\_

Numéro de téléphone autre (indiquer): \_\_\_\_\_

Âge : \_\_\_\_\_

Sexe :  Femme  Homme

### Inventaire des problèmes chroniques de santé

#### 1. Est-ce que votre enfant souffre actuellement ou a déjà souffert :

##### Troubles psychologiques/psychiatriques :

• Une dépression : Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_

• Trouble de santé mentale : Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_

Si oui, lequel : \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

##### Troubles neurodéveloppementaux :

• Troubles moteurs (dysphasie) : Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_

• Troubles du langage : Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_

• Un trouble déficitaire de l'attention (TDAH) : Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_

• Un trouble d'apprentissage : Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_

• Trouble de spectre de l'autisme (TSA) : Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_

- Syndrome de Gilles de la Tourette : Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_
- Syndrome de dysfonction non-verbale : Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_

Troubles neurologiques :

- Troubles de la vision : Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_  
Est-ce vous portez des lunettes? Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_
- Trouble du sommeil : Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_
- Daltonisme : Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_
- Épilepsie : Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_
- Migraines ou maux de tête fréquents : Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_

Autre :

- Avez-vous déjà subi une chirurgie? Oui : \_\_\_\_\_ Non : \_\_\_\_\_  
Pour quelle raison? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Insertion d'une plaque métallique? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Autre problème de santé, maladie connue, allergies, trouble neurodéveloppemental, développemental, psychologique, psychiatrique ou neurologique non mentionné? Si oui, le(s)quel(s) ?**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**4. Énumérez tous les médicaments que vous prenez actuellement.**

Aucun médicament

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Annexe B : Certificat d'approbation de l'éthique



Care postale 1250, succursale HULL  
Gatineau (Québec) J8X 3X7  
www.uqo.ca

---

Gatineau le 22 mars 2018

Madame Jenel Brülé  
Étudiante  
Département de psychoéducation et de psychologie  
Université du Québec en Outaouais

cc: Jennyfer Anasdo  
Professeure  
Département de psychoéducation et de psychologie

Projet #: 2588-B

C'est avec plaisir que nous avons pris connaissance de votre demande de certificat. Comme il s'agit d'une recherche pour laquelle une approbation éthique a déjà été émise, nous avons été en mesure de traiter votre dossier en ne tenant compte que des éléments additionnels que vous nous avez mentionnés. Dans l'ensemble, je constate que votre projet rencontre les normes éthiques établies par l'UQO.

C'est donc avec plaisir que je joins le certificat d'approbation éthique qui est valide pour la durée du projet, à compter de sa date d'émission. La durée prévue du projet est :

**Durée du projet: 1 an**

J'aimerais vous rappeler que pour assurer la conformité de votre certificat éthique pendant toute la durée de votre projet, vous avez la responsabilité de produire un «Rapport de suivi continu» chaque année en vertu de la Politique d'éthique de la recherche avec des êtres humains, ci-après «la Politique». Dans l'éventualité où ce rapport de suivi continu ne serait pas déposé 60 jours après la date où celui-ci aurait dû être déposé, le CER pourrait retirer son approbation éthique. Pour plus d'information, je vous invite à consulter le site internet de l'éthique (<http://uqo.ca/ethique>). Vous devez aussi soumettre au CER toute modification au protocole de recherche pour validation avant la mise en œuvre de ces modifications.

Afin de vous conformer à la Politique, votre "Rapport de suivi continu" doit être transmis au CER le ou avant le:

**22 mars 2019**

**Un avis vous sera transmis par le secrétariat du CER 30 jours avant cette date**

Je demeure à votre disposition pour toute information supplémentaire et vous souhaite bon succès dans la réalisation de cette étude.

Le président du Comité d'éthique de la recherche  
André Durivage

## Annexe C : Formulaire de consentement

### Formulaire de consentement



Université du Québec en Outaouais  
Case postale 1250, succursale B, Hull (Québec), Canada J8X 3X7  
Téléphone (819) 595-3900  
www.uqo.ca

### Formulaire de consentement

#### Validation d'un programme d'entraînement de la Mémoire de Travail dans un environnement virtuel

Département de psychoéducation et de psychologie (819-595-3900)

**Chercheur responsable :**

Stéphane Bouchard, Ph.D.

**Équipe de recherche :** Jenel Brûlé (coordinatrice du projet et candidate au doctorat en Neuropsychologie clinique)

#### Nature et objectifs du projet de recherche

Nous sollicitons votre participation au projet de recherche intitulé « *Validation d'un programme d'entraînement de la Mémoire de Travail dans un environnement virtuel* ».

Le but global de ce projet est de tester et valider notre programme de réhabilitation. Cette phase pilote va nous permettre de valider l'effet de complexité à travers les niveaux du programme d'entraînement et de proposer un programme optimal d'entraînement de la Mémoire de Travail.

#### Déroulement du projet de recherche

Votre participation à ce projet de recherche consiste à prendre part à une séance d'essai d'un programme de réhabilitation en réalité virtuelle qui se déroulera au Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO. La séance durera environ 1,5 heure.

#### Données recueillies

Les données recueillies par cette étude sont entièrement confidentielles et ne pourront en aucun cas mener à votre identification. Votre confidentialité sera assurée. Chaque participant se verra attribuer un code d'identification anonyme qui servira par la suite à l'identifier lors de l'analyse des données. Seulement les chercheurs directement impliqués dans le projet de recherche, ainsi que les assistants de recherche auront accès aux données brutes recueillies dans le cadre de ce projet de recherche. Toutes les données seront stockées sur disques compacts et conservées sous clé.

Une fois les données analysées, les résultats de cette étude pourront être diffusés sous forme de conférences ou d'affiches scientifiques dans des congrès spécialisés ou encore sous forme de résumés et d'articles publiés dans des revues spécialisées. Prenez note qu'aucun résultat brut ne sera dévoilé.

Tous les documents papier seront détruits au bout de cinq ans après la dernière publication scientifique. Toutes les données des questionnaires, des tests et des mesures seront conservées dans des fichiers informatiques. Ces données informatiques, devenues anonymes, seront détruites cinq ans après que

Notamment à des fins de contrôle, et de vérification, vos données de recherche pourraient être consultées par le personnel autorisé de l'UQO, conformément au Règlement relatif à l'utilisation des ressources informatiques et des télécommunications

toutes les analyses de données (y compris des analyses secondaires dans des projets de recherche ultérieurs) soient terminées.

#### **Risques associés au projet de recherche**

Puisque certains risques sont associés à votre participation, le chercheur s'engage à mettre en œuvre les moyens nécessaires pour les réduire ou les pallier.

Les inconvénients de ce projet de recherche sont en lien avec un certain risque d'inconfort :

- (1) Au niveau physique : lorsque vous serez immergé à une reprise dans un environnement virtuel, il est possible de ressentir des malaises pendant ou après l'exposition virtuelle. Ces symptômes sont temporaires et peuvent impliquer une fatigue visuelle, une vision embrouillée, des étourdissements, des nausées ou des maux de tête. Ces effets se dissipent généralement au fur et à mesure que le cerveau s'habitue à l'équipement et l'environnement virtuel. Si ces malaises deviennent trop inconfortables pour vous, vous pourrez cesser la séance en tout temps. Vous devrez attendre une quinzaine de minutes avant de quitter le local; ce délai assurera que vous ne ressentiez pas d'effets secondaires suite à l'exposition virtuelle.

#### **Participation volontaire et possibilité de retrait**

Votre participation à cette étude se fait sur une base volontaire. Vous êtes entièrement libre de participer ou non, et de vous retirer en tout temps sans préjudice. Les risques décrits précédemment associés à votre participation sont minimaux et le chercheur s'engage à mettre en œuvre les moyens nécessaires pour les réduire ou les pallier.

En cas de retrait du projet avant la fin de la rencontre, les données recueillies seront détruites (déchetées) devant vous et ne seront pas utilisées, si tel est votre souhait. Sinon, elles seront utilisées de la même manière que celles des autres participants ayant complété la rencontre (voir ci-dessus).

Si vous avez des questions concernant ce projet de recherche, vous pouvez communiquer Jenel Brûlé par courriel au [brui25@uqo.ca](mailto:brui25@uqo.ca). Ce projet de recherche a reçu l'approbation du Comité d'éthique de la recherche de l'UQO. Si vous avez des questions concernant les aspects éthiques de ce projet, communiquez avec André Durivage, président du Comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec en Outaouais au 819-595-3900 (poste 1781).

Votre signature atteste que vous avez clairement compris les renseignements concernant votre participation au projet de recherche et indique que vous acceptez d'y participer. Elle ne signifie pas que vous acceptez d'aliéner vos droits et de libérer les chercheurs ou les responsables de leurs responsabilités juridiques ou professionnelles. Votre participation devant être aussi éclairée que votre décision initiale de participer au projet, vous devez en connaître tous les tenants et aboutissants au cours du déroulement de la recherche. En conséquence, vous ne devez jamais hésiter à demander des éclaircissements ou de nouveaux renseignements au cours du projet.

**Après avoir pris connaissance des renseignements concernant ma participation à ce projet de recherche, j'appose ma signature en demandant que :**

-Ma candidature soit conservée \_\_\_\_\_

-Ma candidature soit éliminée et que les données soient détruites \_\_\_\_\_

Le formulaire est signé en deux exemplaires et j'en conserve une copie.

Notamment à des fins de contrôle, et de vérification, vos données de recherche pourraient être consultées par le personnel autorisé de l'UQO, conformément au Règlement relatif à l'utilisation des ressources informatiques et des télécommunications

Nom du participant : \_\_\_\_\_

Signature du participant : \_\_\_\_\_

Date : \_\_\_\_\_

Nom du chercheur  
(ou de l'assistant de recherche): \_\_\_\_\_

Signature du chercheur : \_\_\_\_\_

Date : \_\_\_\_\_

#### Utilisation secondaire des données

Avec votre permission, nous aimerions pouvoir conserver les données recueillies à la fin du présent projet pour d'autres activités de recherche dans le même domaine. Afin de préserver vos données personnelles et votre identité, les données seront rendues anonymes, c'est-à-dire qu'il ne sera plus possible à quiconque de pouvoir les relier à votre identité. Nous nous engageons à respecter les mêmes règles d'éthique que pour le présent projet.

- J'accepte une utilisation secondaire des données que je vais fournir.
- Je refuse une utilisation secondaire des données que je vais fournir.

Nom du participant : \_\_\_\_\_

Signature du participant : \_\_\_\_\_

Date : \_\_\_\_\_

Nom du chercheur  
(ou de l'assistant de recherche): \_\_\_\_\_

Signature du chercheur : \_\_\_\_\_

Date : \_\_\_\_\_

Notamment à des fins de contrôle, et de vérification, vos données de recherche pourraient être consultées par le personnel autorisé de l'UQO, conformément au Règlement relatif à l'utilisation des ressources informatiques et des télécommunications