

Table des matières

Sommaire	iv
Remerciements.....	vii
Introduction	1
SECTION 1 : LE CONSTRUIT THÉORIQUE DE LA MÉMOIRE PROSPECTIVE	4
Les caractéristiques de la tâche de mémoire prospective.....	4
Les modèles théoriques de la mémoire prospective.....	16
SECTION 2 : L'ÉVALUATION NEUROPSYCHOLOGIQUE.....	22
SECTION 3 : LE TRAUMATISME CRANIOCÉRÉBRAL	54
Chapitre I Elaboration of a procedure using virtual immersive technology for the assessment of prospective memory and the study of its validity with healthy participants	61
Chapitre II Discriminant Validity of an Ecologically Oriented Virtual Reality Measure among	109
Discussion générale.....	159
L'analyse psychométrique des protocoles d'évaluation utilisés	161
L'évaluation neuropsychologique du fonctionnement quotidien.....	184
Le potentiel écologique de la réalité virtuelle	194
Conclusion	206
La complexité du construit de la mémoire prospective.....	208
La complexité de réaliser une évaluation selon une approche écologique.....	209
L'utilité de la réalité virtuelle	210
La complexité de développer de nouveaux outils d'évaluation	211
Références	216
Appendice A Caractéristiques médicales des participants présentant un traumatisme craniocérébral ayant participé à l'étude du chapitre 2.....	237

Remerciements

Je désire exprimer toute ma gratitude à mon directeur de thèse, Pierre Nolin, qui m'a soutenu tout au long de mon cheminement universitaire et de mes travaux de recherche.

Je le remercie également d'avoir encouragé ma créativité et d'avoir suivi de près tous les travaux menés dans la réalisation de ma thèse. Je désire aussi remercier les membres de mon comité doctoral pour leurs judicieux conseils, ils ont largement contribué à la qualité de cette thèse. Je veux remercier Stéphane Bouchard, pionnier de la réalité virtuelle en psychologie au Québec, pour avoir mis ses ressources humaines en soutien à mes problèmes techniques de même que pour m'avoir prêté des équipements afin de démarrer cette recherche. Un sincère remerciement va aussi aux professeurs Michel Alain et Louis Laurencelle pour les nombreuses consultations dont ils m'ont fait bénéficier concernant mes analyses statistiques.

Ma reconnaissance va également envers la direction du CRDP Le Bouclier qui m'a permis d'entreprendre ce projet doctoral dans ses murs et de développer mes connaissances sur le terrain avec ses programmes de réadaptation, ses spécialistes de même que ses clients. Je désire exprimer ma gratitude au CR La Maison qui a mis ses ressources humaines et financières de même que ses clients à contribution pour cette recherche à caractère multicentrique. Je tiens aussi à remercier les directions du CRDP InterVal et l'IRDPQ de m'avoir ouvert leurs portes pour expérimentation auprès de leurs clients. Un merci chaleureux à Carmen Lemelin qui a contribué au recrutement de l'échantillon témoin en me donnant accès à ses étudiants et collègues du Cégep de

Drummondville. Je tiens aussi à remercier la précieuse et l'incomparable collaboration de Marie-Pier Déry, de Mylène Henry et des auxiliaires de recherche du LARI-RV de l'UQTR; elles ont contribué au recrutement, à l'expérimentation et à la correction des épreuves.

Enfin, je tiens à remercier ma femme Isabelle, mes fils Renaud et Emmanuel qui ont toléré un conjoint et un papa non disponible les fins de semaine de même que plusieurs soirs par semaine. La réalisation de ce projet est une œuvre familiale de co-construction mettant en lumière l'importance du soutien et de l'amour familial dans la réussite d'une telle entreprise.

Introduction

La mémoire prospective a été décrite comme étant une fonction cognitive très importante considérant son impact dans la vie de tous les jours (Einstein & McDaniel, 2004; Kliegel & Martin, 2003). Il est convenu de la définir comme étant la capacité de se souvenir de réaliser une intention dans le futur (Ellis, 1996). D'entrée de jeu, il importe de dire que le terme « mémoire prospective » ne fait pas consensus en recherche lorsqu'il s'agit de décrire les phénomènes impliqués dans la capacité de se souvenir de poser une action dans le futur (McDaniel & Einstein, 2007). En effet, il s'avère que le rappel de l'intention sollicite plusieurs processus exécutifs. Il semble que le terme préféré par plusieurs pour définir le construit théorique de la mémoire prospective soit celui de « réalisation différée d'une intention » (*realization of delayed intention*). Toutefois, d'autres chercheurs ont préféré le terme « mémoire prospective » estimant que la dimension mnésique propre au construit demande également considération (Graf & Utzl, 2001).

Au cours de ce débat conceptuel, Utzl (2008) a proposé d'utiliser le vocable mémoire prospective comme un terme « parapluie » – c'est-à-dire en tant que construit cognitif – désignant l'ensemble des processus impliqués dans la mécanique menant de la planification d'une action vers sa réalisation future. Pour cet auteur, il en irait de même avec le terme mémoire rétrospective en tant que parapluie sous lequel seraient retrouvées la mémoire épisodique à long terme, la mémoire sémantique, etc. Dans le cas de la mémoire prospective, il est élémentaire de retenir que le terme « mémoire » renvoie aux processus mnésiques (mémoire épisodique, principalement) dont la fonction

est d'assister la dimension « prospective » qui elle, mobilise un large éventail de fonctions exécutives dans la réalisation différée d'une intention.

Tenant compte de la proposition d'Uttl (2008) et également du fait que des interactions existent entre les systèmes mnésique et exécutif, le terme mémoire prospective a été préconisé tout au long de cette thèse. Toutefois, un intérêt plus marqué a été porté à la dimension prospective, considérant que le rôle des fonctions mnésiques est déjà bien décrit dans cet ensemble de fonctions contenues dans le construit théorique de la mémoire prospective (Cohen & O'Reilly, 1996; Einstein, McDaniel, Richardson, Guynn, & Cunfer, 1995; Hitch & Ferguson, 1991; Sinnott, 1989; Wilkins & Baddeley, 1978). Les travaux de recherche réalisés au cours de ce projet doctoral ont donc porté sur l'évaluation de la réalisation de la « tâche prospective » plutôt que sur le contenu encodé en mémoire épisodique. Cette position méthodologique est principalement motivée par le fait que, malgré la participation des systèmes mnésiques au rappel du contenu de l'intention, la dimension exécutive domine. Celle-ci nécessite donc des considérations spécifiques, notamment en ce qui concerne la manière dont les fonctions exécutives s'activent dans des situations de la vie quotidienne. Enfin, par l'utilisation de la terminologie « mémoire prospective », cette thèse est restée cohérente avec la majorité des écrits scientifiques contemporains, en adoptant une position mitoyenne dans les débats terminologiques actuels (McDaniel & Einstein, 2007).

La première partie de cette introduction générale décrira les caractéristiques des tâches de mémoire prospective telles qu'utilisées en recherche, les principaux « sous-types » de tâches supportant la réalisation d'une intention de même que les modèles théoriques existant à ce jour. Dans la seconde partie, une analyse critique des approches évaluatives utilisées en neuropsychologie sera réalisée. L'exercice intellectuel consistera ici à opposer deux paradigmes ou idéologies d'évaluation, soit l'approche traditionnelle et l'approche écologique. C'est dans ce contexte que l'apport de la réalité virtuelle à l'évaluation neuropsychologique sera présenté. Enfin, cette introduction sera complétée par la présentation d'une pathologie qui affecte la mémoire prospective dans le quotidien : le traumatisme craniocérébral, qualifié par plusieurs d'épidémie silencieuse (Schlessman, 2010).

SECTION 1 :

LE CONSTRUIT THÉORIQUE DE LA MÉMOIRE PROSPECTIVE

Les caractéristiques de la tâche de mémoire prospective

La conceptualisation d'une tâche de mémoire prospective. Selon Burgess, Gonen-Yaacovi et Volle, (2011), il existe plusieurs situations, dans le quotidien, qui sollicitent la mémoire prospective. Selon ces auteurs, « for experimental purposes in cognitive neuroscience the essential features of these situations have been simplified. » Plus spécifiquement, les processus impliqués dans le rappel prospectif peuvent être

divisés en quatre étapes simples (Kliegel, Mackinlay & Jäger, 2008). Ainsi, au cours de son engagement dans la réalisation différée d'une intention, la personne doit :

1. Formuler une intention en utilisant ses aptitudes de planification et d'élaboration de plans d'action.

2. Retenir l'intention pendant la participation à une tâche concurrente (*ongoing task*).

Lors de cette étape, la personne doit faire le « monitorage » des cibles ou indices (*cues*) de rappel prospectif présents dans l'environnement. De plus, elle doit faire une bonne gestion des interférences (internes ou externes), inhibant ainsi les réponses non appropriées.

3. Amorcer l'intention, par elle-même, à la fin du délai « d'attente » ou lorsque l'indice prospectif se présente dans l'environnement.

4. Exécuter l'action en temps opportun. La dernière étape implique la participation des fonctions exécutives. La mémoire épisodique est également sollicitée, permettant le rappel du contenu de la tâche à réaliser.

Selon McDaniel et Einstein (2007), il existe cinq principales composantes ou « règles » à considérer lors de l'élaboration d'un protocole d'évaluation de la mémoire prospective :

1. L'*exécution de l'action attendue n'est pas immédiate*.

2. La *tâche de mémoire prospective est imbriquée dans une activité concurrente*. En effet, puisque la réalisation différée d'une intention implique le passage du temps, il

faut nécessairement que l'attention soit portée vers au moins une autre tâche pendant ce délai. Dans ce contexte, il ne s'agit pas simplement que la personne réalise une tâche banale en attendant le passage du temps. Elle doit plutôt gérer cette activité comme étant concurrente à la tâche prospective, car elle exige le partage des ressources attentionnelles (Smith & Bayen, 2004; Smith, 2003; Smith, Hunt, McVay, & McConnell, 2007) et elle crée une surcharge dans les moments de monitorage de l'environnement, lors de la recherche des indices prospectifs. L'activité concurrente permet donc d'éviter le rappel continu et conscient de l'intention pendant le délai d'attente (Burgess, Scott & Frith, 2003). Elle doit également apparaître comme étant une composante naturelle de la situation (Graf & Utzl, 2001), ce qui implique qu'il y ait une harmonie entre la tâche concurrente et la tâche prospective. Également, il est évident que l'activité concurrente doit être interrompue afin de permettre l'exécution de la tâche prospective (Shallice & Burgess, 1991). Cette composante permet de faire une distinction entre la mémoire prospective et la mémoire de travail ou les processus de vigilance (Burgess, Scott & Frith, 2003).

3. Le « *laps de temps* » durant lequel il est possible d'amorcer la réponse (*The « Retention Interval »*) doit être restreint. Il semble que certaines activités à réaliser dans le futur ne soient pas des tâches prospectives. McDaniel et Einstein (2007) ont avancé que, par exemple, « le projet de faire le ménage de son grenier n'est pas une intention pouvant s'apparenter au domaine de la mémoire prospective. » En effet,

une tâche est prospective si elle est accomplie à l'intérieur d'une fenêtre circonscrite temporellement.

4. Le *cadre temporel pour l'exécution de la réponse est limité*. La réalisation de certaines intentions ne cadre pas avec le concept théorique de la mémoire prospective. C'est le cas lorsqu'une personne a planifié de lire un livre ou de se trouver un emploi. En effet, ce qui distingue ces tâches de celles dites prospectives est la notion de cadre temporel, c'est-à-dire une courte réponse dans un temps donné. Il s'agit ici du temps requis pour exécuter l'intention elle-même.
5. Il est impératif qu'il y *ait une ou plusieurs intentions* qui seront réalisées par une action physique ou mentale (Burgess, Scott & Frith, 2003). Selon cette règle, l'intention doit avoir été consciemment formulée et planifiée, dès le départ. Ainsi, la définition de tâche prospective doit être restreinte aux comportements qui incluent la formation consciente d'intentions ou de plans (Morris, 1992; Graf & Utzl, 2001), de même que leur réalisation, dans un cadre temporel précis.

Burgess, Scott et Frith (2003) ont ajouté les éléments suivants comme étant des caractéristiques typiques d'une tâche de mémoire prospective :

- L'action attendue (ou la pensée) doit être réalisée dans des circonstances particulières, c'est-à-dire selon un contexte de rappel (*retrieval context*) (Ellis, Kvavilashvili & Milne, 1999). Dans les études de type *event-based*, le contexte de rappel est signalé par un indice (*the « intention cue » ou « prospective memory target »*). Dans les tâches de type *time-based*, le contexte de rappel peut être : a) une

heure particulière; b) un délai précis; c) imbriqué dans une tâche de type *activity-based*.

- L'indice de rappel ne doit pas interférer avec ou interrompre directement les actions réalisées pendant la tâche concurrente. L'action est « auto-initiée » et le participant doit reconnaître l'indice prospectif ou le contexte de rappel par lui-même (plutôt que recevoir une instruction claire d'une source externe), ce qui le différencie du rappel indiqué en mémoire épisodique.
- Dans plusieurs situations impliquant la mémoire prospective, il ne doit pas y avoir de rétroaction immédiate en fonction de la réussite ou d'autres aspects de la performance.

Enfin, selon Burgess et al., (2011), ces critères caractérisant les tâches de mémoire prospective ne sont pas exhaustifs. Les auteurs ont signalé que plusieurs chercheurs ont apporté des variantes à ces éléments généraux et que plusieurs de ces aspects font actuellement l'objet d'un débat. Quoi qu'il en soit, lorsque l'ensemble de ces caractéristiques est présent, il apparaît que la plupart des théoriciens s'entendent pour dire qu'il s'agit bien d'une tâche qui mesure la mémoire prospective.

Les types de rappels prospectifs. Certains auteurs ont établi une distinction entre la réalisation immédiate et différée d'une intention. Selon Graf et Utzl (2001), la réalisation immédiate d'une intention (après un très court délai) solliciterait les fonctions d'attention, de vigilance et de mémoire de travail. Dans ce contexte, la personne n'aurait

pas le temps de porter son attention sur une tâche concurrente, restant concentrée sur la réalisation imminente de l'action. Or, afin de solliciter la mémoire prospective, il est impératif que l'intention soit différée dans le temps (p. ex. : en termes d'heures ou de jours). Sur le plan théorique, cette distinction se rapporte surtout aux fonctions exécutives (p. ex. : monitorage, désengagement/réengagement en lien avec la tâche concurrente et la tâche prospective, etc.).

Les fonctions exécutives permettent à la personne de s'engager avec succès dans des comportements auto-initiés et orientés vers un but. Lorsque ces fonctions sont perturbées, la personne risque de présenter des difficultés à prendre soin d'elle-même, de ses finances tout comme elle peut être incapable de s'acquitter de plusieurs responsabilités sociales, familiales ou professionnelles (Lezak, 2012). Plusieurs fonctions exécutives, intégrées dans la mémoire prospective, sont essentielles à une vie autonome et « sécuritaire ». En effet, de nombreuses tâches prospectives sont imbriquées dans les activités quotidiennes. La capacité de réaliser ces tâches avec succès contribue certainement à une participation sociale optimale. Ainsi, la mémoire prospective est imbriquée dans plusieurs activités jugées critiques pour le maintien de la santé et de l'intégrité physique d'une personne (Shum, Fleming, & Neulinger, 2002). Toutefois, cet aspect écologique de la mémoire prospective en fait un construit difficile à cerner, principalement parce que ses différentes composantes s'expriment surtout dans le quotidien. Dans cet ordre d'idées, Kvavilashvili et Ellis (1996) ont décrit trois types de tâches soutenant la réalisation d'une intention. Il s'agit des tâches basées sur l'événement

(*event-based*), basées sur l'activité (*activity-based*) ou basées sur le temps (*time-based*).

Il est important de noter que les deux premières catégories sont souvent retrouvées sous le même vocable dans les écrits scientifiques, soit celui des tâches de type *event-based*.

Les tâches de type *event-based* impliquent la réalisation de l'intention par un indice présent dans l'environnement, susceptible de solliciter le rappel de l'information. C'est le cas lorsqu'une personne doit acheter du jus d'orange au retour du travail et qu'elle s'en souvient lorsqu'elle passe devant l'épicerie, après avoir procédé au monitorage de l'environnement pendant son trajet. Ici, l'épicerie représente la cible prospective recherchée par les processus de monitorage. De prime abord, ce type de tâche serait plus facile à rappeler en raison de la présence d'un indice lié à l'environnement (Wilson, Greenfield, Clare, Baddeley, Cockburn, Watson, Tate, Sopena, Nannery, & Crawford, 2010). Le fonctionnement d'une personne aux tâches de type *event-based* pourrait être vu de deux manières sur la base du *Multiprocess Model*¹ de McDaniel et Einstein (2000). En « mode automatique », la personne ne cherche pas nécessairement à réaliser l'action attendue jusqu'à ce que l'événement lui rappelle (comme un *pop-up*) le plan d'action dans lequel elle s'était engagée. En « mode stratégique », la personne exécuterait la tâche concurrente tout en faisant le monitorage de l'environnement jusqu'à ce qu'elle aperçoive l'indice recherché.

¹ Le *Multiprocess Model* sera décrit en détail dans la prochaine section.

Les tâches de type *activity-based* consistent à exécuter une action avant ou après la réalisation d'une activité, comme c'est le cas lorsqu'une personne doit fermer sa cuisinière après utilisation. Ce type de tâches semble se distinguer des autres. En effet, Kvavilashvili et Ellis (1996) ont mentionné que le contenu des tâches *activity-based* ne requiert pas toujours l'interruption de la tâche concurrente, précisément parce que l'intention est rappelée soit au moment d'amorcer ou de terminer l'action. D'autres auteurs, en désaccord avec cette interprétation, ont suggéré, à titre d'exemple, que prendre sa médication après le déjeuner (tâche basée sur l'activité) demande d'interrompre la tâche de « se rendre à l'auto pour aller travailler » (tâche concurrente) (Kliegel, McDaniel, & Einstein, 2000). Quoi qu'il en soit, il n'est pas établi actuellement que toutes les tâches prospectives doivent interrompre l'activité concurrente. En synthèse, il semblerait que les tâches de mémoire prospective de type *activity-based* soient considérées comme étant une forme très simple de mémoire prospective parce qu'elles bénéficient de la présence d'un indice externe saillant permettant de rappeler l'intention.

Les tâches de type *time-based* consistent essentiellement à rappeler puis à exécuter une intention à une heure précise ou après un certain délai. Tel est le cas lorsqu'une personne a un rendez-vous téléphonique à 9 h ou lorsqu'elle doit revoir un collègue, quinze minutes après l'exécution d'une action. Bien que la référence soit ancienne, il faut tout de même mentionner que l'expérience de Ceci et Bronfenbrenner (1985) est l'une des plus importantes recherches réalisées sur les indices de temps. En effet, dans

dans cette étude, les chercheurs ont observé que le monitorage de l'horloge s'accentue lorsque le délai de réalisation de l'intention est presque échu. Ainsi, peu importe la durée séparant la planification de l'intention de sa réalisation, la période de monitorage la plus efficiente est restreinte en termes de temps. De cette manière, les ressources attentionnelles deviennent disponibles et peuvent être investies sur la réalisation de la tâche concurrente (Graf & Grondin, 2006).

Des auteurs ont mentionné que les tâches de type *time-based* sont davantage reliées aux processus attentionnels et exécutifs parce que l'indice prospectif doit être autogénéré (Einstein & McDaniel, 1996). Il est donc supposé que ces tâches sont exigeantes parce qu'elles nécessitent un monitorage du temps qui passe et aussi parce qu'elles mobilisent beaucoup les processus d'inhibition et les mécanismes de contrôle (Groot, Wilson, Evans, & Watson, 2002). Selon Graf et Grondin (2006), le rappel des tâches de type *time-based* serait sensible au contexte. En effet, les participants qui réalisent la tâche dans un environnement familier seraient moins anxieux alors que ceux qui la réalisent en laboratoire verrraient la tâche comme étant plus importante. Dans ce contexte, ils auraient tendance à regarder l'heure plus souvent, ce qui expliquerait la meilleure performance.

À première vue, il serait possible de dire que les processus impliqués dans les tâches de type *time-based* sont différents des tâches de type *event-based*. En effet, au moment où les indices externes spécifiques sont disponibles pour signaler qu'il est temps de réaliser l'intention dans une tâche *event-based*, aucun indice externe n'est disponible

pour les tâches de type *time-based*. Toutefois cette distinction peut rapidement être nuancée, surtout si la tâche demande de lire l'heure (ou d'en faire le monitorage) (Graf & Grondin, 2006). En effet, les aiguilles de l'horloge (ou les chiffres attendus sur l'horloge numérique) sont des indices externes basés sur des événements, de la même manière qu'apercevoir un collègue dans le corridor peut servir d'indice de rappel prospectif.

Il semblerait également que les tâches de type *event-based* et *activity-based* sollicitent moins les lobes frontaux parce que l'indice est habituellement généré par l'environnement (Einsitein & McDaniel, 1996; Cockburn, 1995) ou par la tâche concurrente elle-même. Elles seraient donc plus faciles que les tâches de type *time-based*. Toutefois, d'autres études ont également évalué les composantes de la mémoire prospective et ont démontré que les processus exécutifs et la mémoire rétrospective sont impliqués, à différents niveaux, dans chacun des types de tâches (Knight, Titov & Crawford, 2006; Mathias & Mansfield, 2005). Ce pourrait donc être la modulation plus ou moins importante des fonctions cognitives impliquées dans la réalisation de l'intention qui influencerait le niveau de difficulté de la tâche. Cependant, il semble exister un débat à savoir si les tâches de type *time-based* sont plus difficiles que les autres types de tâches. Selon Smith (2008), les tâches de mémoire prospective de type *event-based* seraient tout aussi exigeantes que les autres puisqu'elles nécessiteraient une alternance entre le monitorage des indices prospectifs présents dans l'environnement et la concentration portée à la tâche concurrente. Park, Hertzog, Kidder, Morrell, et Mayhorn (1997) ont démontré que la performance à une tâche de mémoire prospective

de type *event-based* est moins bien réussie, chez la personne âgée, lorsqu'elle est associée à une tâche de mémoire de travail. Ceci pourrait impliquer que le niveau de difficulté d'une tâche *event-based* dépendrait des ressources cognitives disponibles pour assurer le monitorage de l'environnement et le partage attentionnel entre les tâches prospective et concurrente, ce qui vient appuyer l'idée de Smith (2008). Cependant, selon les auteurs, les tâches de type *time-based* demeurent plus difficiles à réaliser. Ainsi, bien que plus difficiles, les tâches de type *time-based* pourraient parfois être réalisées en initiant les processus attentionnels de type automatique sans trop désinvestir les ressources octroyées à la tâche concurrente (Ceci & Brofrenbrenner, 1985). Cela pourrait être plus vrai dans le quotidien qu'en laboratoire, car certains marqueurs de temps pourraient être associés à une activité réalisée par la personne.

De nombreuses évidences empiriques ont indiqué que tous les indices de rappel ne sont pas équivalents en termes d'efficacité (Brandimonte & Passolunghi, 1994; Einstein & McDaniel, 1990; McDaniel & Einstein, 1993). Ainsi, les indices plus saillants seraient plus efficaces que les indices plus subtils; les indices se présentant dans le champ de vision central seraient plus efficaces que ceux qui se présentent dans le champ de vision périphérique. Ceci implique que les tâches de type *event-based* et *time-based* peuvent être comparables en terme de difficulté si les types de tâches et les types d'indices sont croisés.

Un autre facteur qui complique les efforts de distinction entre les rappels de type *event-based* et *time-based* est que le participant peut transformer un type en l'autre. Des entrevues menées avec les participants d'une recherche (Siu & Graf, 2005) ont démontré ce phénomène. Par exemple, ces participants devaient décrire les stratégies qu'ils allaient utiliser pour se souvenir d'un rendez-vous chez le médecin à 14 h jeudi. Ils ont alors établi un lien - une association - entre la planification de la tâche et d'autres activités ou événements qu'ils avaient dans la même journée (p. ex. : se rendre au rendez-vous chez le médecin après le cours de yoga).

La section qui précède a d'abord décrit les principaux critères d'une tâche de mémoire prospective valide. Ensuite, elle a tenté de faire la distinction entre les différents types de rappel qui sollicitent la mémoire prospective. Elle a également tenté de jeter un regard critique, basé sur des données probantes, sur le niveau de difficulté propre à chaque type de rappel. Ainsi, il a été possible de voir que le niveau de difficulté dépend non seulement du type de rappel mais aussi du contexte dans lequel l'intention doit être rappelée, de même que du type d'indices présents pour indiquer que le moment d'exécuter l'action est venu. Ainsi, il semble clair que les tâches de type *activity-based*, qu'elles interrompent ou non la tâche concurrente, sont plus faciles à réaliser en raison du fait qu'elles sont imbriquées dans la tâche concurrente. Il subsiste toutefois une controverse à l'effet que les tâches de type *time-based* soient plus difficiles que les tâches de type *event-based* qui, toutes deux, peuvent solliciter les lobes frontaux. Il semble donc que le niveau de difficulté dépende du type d'indices présents dans

l'environnement, de la manière dont la personne prépare son plan d'action et dont elle gère les interférences.

L'histoire de la recherche portant sur la mémoire prospective est relativement récente (début des années 1980) et le construct théorique demeure difficile à cerner, encore aujourd'hui. Quelques chercheurs ont tenté de décrire la mémoire prospective par l'élaboration de différents modèles inspirés de la psychologie cognitive ou de la neuropsychologie. Quelle que soit l'approche préconisée, l'objectif demeure le même : comprendre et expliquer les phénomènes complexes (cognitifs et psychosociaux) impliqués dans la mémoire prospective. La section qui suit tente d'approfondir ces modèles théoriques de la mémoire prospective.

Les modèles théoriques de la mémoire prospective

Levy et Loftus (1984) sont les premiers auteurs à avoir proposé une modélisation de la mémoire prospective. Ils avaient observé qu'elle était particulièrement sensible au vieillissement; celui-ci perturbant parfois plusieurs processus essentiels à la réalisation d'une intention dans le futur. C'est à partir de ces constats qu'a émergé l'idée que des « processus multiples » étaient impliqués dans la mémoire prospective : il existerait donc des interactions entre les différentes fonctions cognitives. Enfin, ces observations ont motivé l'élaboration de deux principaux modèles cognitifs de la mémoire prospective, soit : le *Multiprocess Model* de McDaniel et Einstein (2000) et le *Preparatory*

Attentional and Memory Processes de Smith & Bayen (2004). Ces deux modèles seront décrits en détail dans les paragraphes suivants.

Multiprocess Model. Le *Multiprocess Model* (Einstein, McDaniel, Thomas, Mayfield, Shank, & Morissette, 2005; McDaniel & Einstein, 2000; McDaniel, Guynn, Einstein, & Breneiser, 2004) suppose que le rappel prospectif est pris en charge par des processus automatiques et par des processus stratégiques. Ce modèle théorique établit également une distinction entre les indices de rappel focaux et non focaux. Les premiers englobent les informations pertinentes au rappel prospectif pendant que la personne s'active sur la tâche concurrente. Les seconds représentent les informations présentes dans l'environnement, mais non essentielles au rappel prospectif. Les indices non focaux sont en quelque sorte des stimuli parasites qui ne devraient pas être pris en considération par la personne puisqu'ils ne sont pas pertinents pour la tâche de mémoire prospective.

En ce qui concerne les processus automatiques, le rappel de l'intention devrait survenir lorsqu'un indice focal attendu interagit avec la mémoire rétrospective. Ceci serait la résultante d'une sorte d'association des systèmes mnésiques de type indice intention (McDaniel, Robinson-Riegler, & Einstein, 1998; McDaniel, Einstein, & Rendell, 2008). Ainsi, lorsque la personne utilise des processus de rappels automatiques, le seul contact avec la cible suffirait pour rappeler l'intention. Dans ce cas, il serait donc logique de penser que la personne qui fonctionne selon un mode automatique solliciterait une participation moindre de ses lobes frontaux. Le rappel indicé par les

stimuli saillants limiterait l'utilisation des systèmes exécutifs. Selon certains auteurs, les processus automatiques seraient attentionnels ou mnésiques (Mandler, 1980; McDaniel, 1995; Einstein & McDaniel, 1996), contrairement aux processus stratégiques qui seraient essentiellement exécutifs. Toutefois, cette conception du rappel en mémoire prospective a été contestée dans les travaux de Smith (2003), qui a démontré que les rappels prospectifs ne sont pas automatiques. De plus, les travaux réalisés en neuro-imagerie ont également démontré la participation des lobes frontaux dans tous les types de tâches de mémoire prospective (Bisiacchi, Cona, Schiff & Basso, 2011; Burgess, Quayle & Frith, 2001; Kalpouzos, Ericksson, Sjölie, Molin & Nyberg, 2010).

Le *Multiprocess Model* propose aussi que l'alternance entre la tâche concorrente et l'intention est un processus volontaire et stratégique (McDaniel & Einstein, 2000). Celui-ci serait géré par un système attentionnel exécutif : le *Supervisory Attentional System* (SAS) de Norman et Shallice (1986). Ce système permet d'abord l'encodage de l'association entre l'événement externe pertinent et l'action attendue. Par la suite, il contribue au monitorage de l'environnement lors de la recherche de la cible afin de déclencher le signal permettant de réaliser l'action (Burgess & Shallice, 1997; Ellis, 1996). Lorsque l'événement-cible est repéré, le SAS interrompt l'activité concorrente afin de permettre la réalisation de l'action. La fonction du SAS dans le *Multiprocess Model* serait de supporter la réalisation du plan d'action, particulièrement en augmentant l'activation des scripts attendus et en diminuant l'activation des scripts non attendus par un processus d'inhibition. Il est important de dire que les associations automatiques et

les processus contrôlés sont impliqués dans tous les types de rappels, que ce soit *event-based, activity-based ou time-based* (McDaniel, Guynn, Einstein & Breneiser, 2004). La participation de ces processus dépendrait des caractéristiques spécifiques de la tâche (McDaniel & Einstein, 2000).

Preparatory Attentional and Memory Processes (PAM). Le *Preparatory Attentional and Memory Processes* (PAM) de Smith et Bayen (2004) est un modèle élaboré en opposition au *Multiprocess Model*. La distinction la plus importante se retrouve dans le concept d'automaticité. En effet, tel que mentionné précédemment, selon McDaniel et Einstein (2000), le rappel de l'intention peut parfois être automatique et d'autres fois conscient. Au contraire, le PAM suggère que le rappel en mémoire prospective n'est jamais automatique. À la base de ce modèle, il y a l'idée que la tâche prospective sollicite les fonctions d'attention divisée. Selon Smith (2003), les tâches concurrentes et prospectives, qui se réalisent simultanément, font des demandes continues aux ressources attentionnelles qui elles, sont limitées. En plus de solliciter les processus attentionnels préparatoires, il semble que la réussite de la tâche prospective implique également les systèmes mnésiques par la reconnaissance de l'événement permettant la réalisation de l'action. Les processus de mémoire rétrospective sont ainsi sollicités lorsque la cible est détectée consécutivement au travail réalisé par les processus attentionnels.

Selon Smith et Bayen (2004), le PAM suggère que les processus préparatoires sont requis pour obtenir une bonne performance aux tâches de type *event-based*. Ils requièrent un monitorage non automatique de l'environnement à la recherche des cibles prospectives. Ces processus préparatoires peuvent être impliqués pendant l'intervalle de temps situé entre la planification et le rappel de l'intention ou au moment de réaliser l'action attendue. Par conséquent, dès qu'une tâche prospective est imbriquée dans une tâche concurrente, les ressources cognitives dirigées sur cette dernière sont réduites même si les indices prospectifs ne sont pas présents dans l'environnement. Les processus cognitifs étant limités en termes de ressources, leur « énergie » doit être partagée entre un monitorage des indices prospectifs et une concentration sur l'activité concurrente. Certains processus seraient dévolus à l'évaluation de l'environnement afin de répondre adéquatement lorsque le marqueur prospectif se présente. À ce moment précis, le plan d'action surgirait dans le champ de la conscience par le biais des processus attentionnels (*preparatory attentionnal*) en association avec les mécanismes de rappel (*preparatory memory*) du contenu de la tâche. Cependant, afin que le plan d'action soit correctement restauré dans la conscience, il convient que le contexte de rappel prospectif soit suffisamment lié au contexte de l'encodage. Dans plusieurs cas, le contexte interne de rappel serait également important. Ainsi, les probabilités de restauration des processus nécessaires à la réalisation de la tâche prospective diminuent si l'état de tension interne de la personne change en raison de sa participation à la tâche concurrente (Smith, 2003).

En résumé, selon la théorie du PAM, le succès dans une tâche prospective requiert des ressources attentionnelles avant que la cible soit identifiée et requiert des ressources cognitives pour le rappel de l'intention (Smith, 1999, Smith, 2003; Smith & Bayen, 2004). Les capacités cognitives dévolues à la tâche de mémoire prospective peuvent prendre la forme d'un monitorage de l'environnement ou de changements subtils au plan de l'allocation des ressources attentionnelles et ce, jusqu'à l'identification de la cible qui est perçue comme un signal ou une opportunité de réaliser l'intention, ce que Smith (2003) appelle « processus d'anticipation ».

En synthèse, il est apparu que ces deux modèles théoriques, décrits dans cette section (c.-à-d. *Multiprocess Model* et PAM), présentent des similitudes. En effet, ils s'entendent pour affirmer que le construct de la mémoire prospective est divisé en deux sous-composantes, l'une faisant appel aux processus mnésiques et l'autre, aux processus exécutifs. Il a aussi été démontré, par les deux modèles théoriques, que la réalisation d'une intention sollicite plusieurs fonctions cognitives et réseaux neuroanatomiques; parfois, les processus peuvent être en compétition et ainsi créer une surcharge cognitive. À ce moment, plusieurs ressources cognitives sont engagées, telles que l'alternance de l'attention, le monitorage des marqueurs prospectifs, la gestion de l'information en mémoire de travail, l'activation/désactivation de certaines aires cérébrales complémentaires à la prise de décision, etc.

Par ailleurs, la prochaine section de cette introduction s'intéresse à la façon dont la mémoire prospective (et l'ensemble des fonctions cognitives qui y contribuent) peut être évaluée en neuropsychologie. Pour ce faire, différents types d'évaluation seront présentés en opposant les évaluations dites traditionnelles (le plus souvent de type papier-crayon) aux évaluations dites écologiques (le plus souvent réalisées dans le milieu de vie des individus).

SECTION 2 : L'ÉVALUATION NEUROPSYCHOLOGIQUE

L'évaluation neuropsychologique traditionnelle est très efficace lorsqu'il s'agit d'isoler et de délimiter les différentes sous-composantes du fonctionnement cognitif. Toutefois, elle ne reflète pas toujours la façon dont ces fonctions interagissent dans la réalisation des habitudes de vie de la personne (Parsons, Rizzo, & Buckwalter, 2004; Parsons, Rizzo, Van der Zaag, McGee, & Buckwalter, 2005).

Les méthodes utilisées pour tracer ou isoler le profil cognitif d'une personne consistent à lui administrer une série de tests standardisés et normalisés dans des conditions de laboratoire (Manchester, Priestley, & Jackson, 2004). Ainsi, l'évaluation neuropsychologique traditionnelle utilise principalement des outils de type papier-crayon, ce qui la rend en apparence artificielle; c'est d'ailleurs l'une des raisons pour laquelle elle a souvent été critiquée (Burgess, Simons, Dumontheil, & Gilbert, 2005;

Burgess et al., 2006). Toutefois, il faut noter que l'évaluation neuropsychologique traditionnelle est très utile dans la détection des déficits, ce qui est nécessaire pour comprendre le fonctionnement de la personne (Lewis, Babbage & Leathem, 2011). Par contre, son faible degré de validité écologique (Parsons & Rizzo, 2008; Parsons, Silva, Pair, & Rizzo 2008) a été démontré par l'existence de liens insuffisants entre les résultats aux épreuves des fonctions cognitives et le fonctionnement au quotidien de la personne (Burgess, Alderman, Emslie, Evans, & Wilson, 1998; Burgess et al., 2006; Chaytor et al., 2006, Manchester, 2004). Dans le même ordre d'idées, Shallice et Burgess (1991) de même que Wilson, Alderman, Burgess, Emslie et Evans (1996) ont rapporté que les mesures cliniques standardisées n'étaient pas suffisamment sensibles pour identifier les problèmes tels que vécus par la personne dans son quotidien. Encore aujourd'hui, en 2013, les chercheurs observent des situations où les personnes fonctionnent de manière autonome dans leur quotidien en dépit de problématiques importantes relevées par l'évaluation neuropsychologique traditionnelle (Lewis, Babbage & Leathem, 2011). C'est pour cette raison que le *International Classification of Functioning, Disability and Health model* (ICF model; Peterson, 2005) a souligné que l'évaluation traditionnelle met en relief les capacités (*capacities*) de la personne à compléter une tâche dans un environnement standardisé sans égard à la performance (*performance*), qui elle, renvoie aux capacités de compléter une tâche dans l'environnement de vie d'une personne (World Health Organisation, 2001).

Ainsi, l'évaluation neuropsychologique traditionnelle peut être critiquée pour son manque de sensibilité et de représentativité concernant la réalité quotidienne, qui sollicite les fonctions cognitives d'une autre façon. Par exemple, en situation d'évaluation traditionnelle, le participant doit résoudre dans un délai très court des problèmes qu'il n'a jamais vus auparavant. L'évaluateur doit également jouer un rôle actif en structurant, guidant et fournissant des indices au participant tout au long de la réalisation de sa tâche, ce qui ajoute à l'aspect « non écologique » de la démarche. Rares sont les épreuves neuropsychologiques traditionnelles qui permettent à la personne évaluée de s'organiser par elle-même dans la planification de l'action et de prioriser les tâches à compléter (Shallice & Burgess, 1991), comme c'est le cas dans la vie quotidienne. Dans le même ordre d'idées, Spikman, Boelen, Lamberts, Brouwer et Fasotti (2010) ont démontré qu'il existe des différences significatives entre les participants présentant des lésions cérébrales acquises (*acquired brain injury*) et le groupe témoin seulement dans des mesures fonctionnelles des comportements et non pas dans des mesures traditionnelles. Selon eux, ces résultats démontrent la difficulté d'évaluer les fonctions cognitives selon une perspective écologique.

Cependant, des épreuves neuropsychologiques ont été développées pour faciliter l'évaluation des fonctions exécutives en contexte non structuré. Ces épreuves, qui ont contribué au renouveau de la neuropsychologie, représentent une sorte de pont entre les épreuves de type papier-crayon et les épreuves réalisées dans les milieux de vie. Un exemple de ce type d'épreuves serait le *Modified-Six Elements Test* (MSET), un

instrument de mesure composant le *Behavioural Assessment of the Dysexecutive Syndrome* (BADS) de Wilson et al. (1996). Les tâches proposées par le MSET visent la mobilisation des capacités de planification, d'organisation ainsi que la flexibilité cognitive dans un contexte libre et non structuré. La personne évaluée doit réaliser trois épreuves simples dans un temps limité tout en respectant un certain nombre de règles. Son originalité repose sur « la non-intervention » de l'évaluateur en cours d'épreuve (Garnier, Enot-Joyeux, Jokic, Le Thiec, Desgranges, & Eustache, 1998).

Selon Norris et Tate (2000), la validité écologique du MSET est appuyée par le fait qu'il est fortement corrélé au *Dysexecutive Questionnaire* (DEX). Ce dernier est administré aux proches de la personne évaluée et consiste à décrire les comportements quotidiens liés aux fonctions exécutives. Les chercheurs ont mentionné que le MSET est comparable aux autres tests standardisés permettant de discriminer les gens ayant des lésions frontales de ceux qui n'en ont pas et qu'il a une validité écologique supérieure en termes de prédiction des compétences fonctionnelles des personnes dans le quotidien. Toutefois, bien que le MSET soit capable de dépister certaines dysfonctions exécutives, il semble que le DEX (auquel le MSET est corrélé) s'avère d'une utilité clinique supérieure. En effet, le questionnaire DEX est apparu comme un bon indicateur des problèmes fonctionnels dans le quotidien alors que le MSET éprouve quelques difficultés au plan de la répétition de la mesure. Pour les cliniciens voulant dépister et mesurer l'évolution des troubles exécutifs dans le quotidien ou avoir des indications

avant et après traitement, il serait davantage recommandé d'utiliser le DEX que le MSET car l'étendue des problèmes exécutifs est décrite avec plus de précision.

Dans « les affrontements » entre les tenants des approches traditionnelles et ceux des approches écologiques, l'angle d'attaque consiste toujours à se demander si l'épreuve traditionnelle (p. ex. : la tour de Londres) est représentative des habiletés exigées par le quotidien. Dans un tel contexte, il est légitime de se demander quel est le lien direct entre le fait de préparer un repas et placer plusieurs anneaux sur une tige de bois en fonction de règles précises afin de reconstruire un modèle, malgré que ces deux types de tâches exigent de bonnes habiletés de planification. En effet, il est apparu que la performance d'une personne à des épreuves neuropsychologiques traditionnelles est moins apparentée à la réalité des comportements qui seront produits dans la vie quotidienne que celle réalisée selon une approche écologique (Zakzanis, Graham, Campbell & Mraz 2004), surtout face aux imprévus. Par conséquent, l'un des principaux problèmes reliés à l'évaluation neuropsychologique traditionnelle serait un manque de validité écologique car elle est considérée comme étant éloignée de la réalité de laquelle elle est censée prédire la performance (Campbell, Zakzanis, Jovanovski, & Joordens 2009).

Encore aujourd'hui, il semble difficile d'obtenir un consensus sur une définition de la validité écologique (Kvavivalshvili & Ellis, 2004). Malgré l'existence d'un débat conceptuel concernant cette notion, certains auteurs ont décrit la validité écologique

comme étant la capacité d'un test à recréer des situations du quotidien soit dans une perspective évaluative, soit dans une perspective thérapeutique (Wilson, Evans, Emslie, Zungwill, Alderman, & Burgess, 1998). En d'autres termes, un test serait écologiquement valide s'il est en mesure d'établir une relation fonctionnelle et prédictive entre la performance d'un participant dans la résolution d'un ensemble de problèmes cognitifs et ses comportements (Sbordone, 1996) dans une variété de situations définies dont le quotidien sert de validité de contenu (Burgess, Alderman, Emslie, Evans, & Wilson, 1998). En comparaison avec l'évaluation traditionnelle, qui cherche surtout à démontrer la meilleure performance possible (Long & Collins, 1997) d'une personne dans l'utilisation de ses fonctions cognitives, l'évaluation écologique vise surtout à faire ressortir ce qu'elle fait dans son environnement naturel (McCue & Pramuka, 1998).

Au plan psychométrique, la validité écologique d'un test renvoie donc au degré avec lequel les résultats obtenus dans un contexte d'évaluation standardisée sont corrélés aux situations du quotidien (Frazen & Wilhelm, 1996). En d'autres mots, la démarche évaluative recherche la généralisation des observations à d'autres situations que celles dans lesquelles s'est faite la collecte de données (Chaytor et al., 2003), soit à la performance dans le quotidien. Il est important de mentionner qu'il ne s'agit pas ici de la validité de construit du test lui-même, mais des inférences qui peuvent en être tirées (Franzen & Arnett, 1997); de cette façon, un test qui a de bonnes capacités diagnostiques n'est pas nécessairement écologiquement valide. Le *Wisconsin Card Sorting Test* serait

de cette catégorie. Conceptuellement, afin de connaître le potentiel écologique d'un test, il peut être intéressant de le scruter sous les angles de la vérisimilitude et de la véridicalité.

La vérisimilitude représente le degré avec lequel la demande cognitive d'un test ressemble théoriquement aux demandes retrouvées dans le quotidien (Franzen & Wilhelm, 1996). Cette approche implique de délaisser les tests existants afin d'en créer de nouveaux en ayant en tête l'objectif de reproduire le quotidien (Chaytor et al., 2003; Wilson et al., 1998). Ces tests tendent à présenter une meilleure validité apparente et de critère (prédictif) que les tests traditionnels, puisqu'ils simulent les exigences cognitives des tâches retrouvées dans le quotidien de la plupart des gens. L'enjeu est donc d'évaluer, le plus précisément possible, la façon dont le test capture l'essence des habiletés d'une personne dans son quotidien.

La véridicalité, de son côté, renvoie au degré avec lequel un test existant est empiriquement relié aux mesures du fonctionnement quotidien (Franzen & Wilhelm, 1996). Ainsi, le test (traditionnel) n'est pas élaboré avec l'intention d'être écologiquement valide, même s'il peut être prédictif de la façon dont les fonctions cognitives vont s'exprimer dans le quotidien. De manière générale, la véridicalité d'un test est déterminée de manière empirique par des analyses statistiques qui relient la performance du test traditionnel aux mesures réelles prises dans le quotidien. Le

construit du test n'est pas écologique, mais il est utilisé en vue de faire des prédictions quant au fonctionnement d'une personne dans son quotidien.

Tel qu'il a été possible de le voir dans cette première partie traitant de l'évaluation neuropsychologique, deux principaux courants de pensée s'affrontent encore aujourd'hui. Le premier affirme que l'évaluation dite traditionnelle a initialement été conçue pour identifier les problématiques cognitives directement en lien avec les structures cérébrales. Évidemment, la venue d'outils médicaux sophistiqués, tels que les examens d'imagerie par résonance magnétique, a rendu moins utile ce type d'expertise. C'est pourquoi les neuropsychologues, dans le deuxième courant de pensée, ont commencé à s'intéresser au lien qui existe entre le profil cognitif et le fonctionnement de la personne. Devant les problèmes de représentativité des tests traditionnels par rapport au quotidien, un nouveau type d'évaluation a vu le jour : l'évaluation écologique. Cette nouvelle façon de voir les épreuves existantes (sous l'angle de la véridicalité) ou de mettre à jour de nouveaux tests (sous l'angle de la vérisimilitude) engendre des débats théoriques et cliniques intéressants. Ces perspectives évaluatives touchent directement le construit de la mémoire prospective, car l'un des facteurs centraux dans son évaluation concerne justement la validité écologique des tâches existantes (Phillips, Henry, & Martin, 2008). C'est pourquoi la section qui suit traite des mesures traditionnelles et écologiques de la mémoire prospective.

L'évaluation neuropsychologique de la mémoire prospective. Selon Phillips et al. (2008), il existe cinq types d'évaluation de la mémoire prospective répartis sur un continuum allant du plus artificiel (*low ecological validity*) au plus réaliste (*high ecological validity*). Le « type 5 » inclut des tâches artificielles réalisées en laboratoire. Le « type 4 », bien qu'il soit également réalisé en laboratoire, est de nature dite réaliste. Pour sa part, le « type 3 » implique le participant dans des tâches complexes qui peuvent être réalisées soit dans un environnement réel, soit dans un environnement virtuel. Bien que de nature écologique, les tâches du type 3 demeurent toutefois à l'extérieur des expériences du quotidien étant donné qu'elles sont structurées par l'expérimentateur. Quant au « type 2 », il se réalise toujours dans l'environnement réel, la tâche expérimentale se trouvant imbriquée dans le quotidien de la personne. C'est le cas par exemple pour les tâches qui exigent de téléphoner au chercheur ou d'inscrire des données temporelles dans un agenda. Enfin, les tâches de « type 1 » sont considérées comme étant hautement écologiques, se réalisant de manière naturelle dans le quotidien de la personne. Il s'agit de tâches aussi familières que de prendre sa médication ou de retourner un livre emprunté à la bibliothèque.

Les tâches de type 2 et de type 1 du modèle de Phillips et al. (2008) présentent des défis méthodologiques et psychométriques importants sur le plan de la mesure. Compte tenu de la complexité de la cueillette de données et considérant les difficultés de standardisation et de normalisation, il n'existe actuellement pas de telles tâches disponibles pour l'évaluation neuropsychologique de la mémoire prospective. Ainsi,

seuls des outils appartenant aux types 5, 4 et 3 ont été retrouvés dans les écrits scientifiques. Les paragraphes qui suivent se veulent donc une synthèse de ces travaux et une réflexion sur les limites de ces outils.

Le type 5, considéré par Phillips et al. (2008) comme ayant une faible valeur écologique, regroupe les tests traditionnels de type laboratoire qui évaluent la mémoire prospective. Il importe de rappeler que dans le passé, et contrairement aux autres fonctions mnésiques, peu de tests neuropsychologiques ont été développés pour mesurer directement la mémoire prospective (Thöne-Otto & Walther, 2008). En effet, force est de constater que des épreuves traditionnelles de la mémoire telles que le célèbre *Weschler Memory Scale-III* (Weschler, 1997) ne contiennent aucun sous-test permettant l'évaluation de la mémoire des intentions.

Dans la plupart des études consultées, il a été possible d'inclure dans cette catégorie (type 5) essentiellement les procédures expérimentales. En général, l'évaluation réalisée en laboratoire doit inclure une période de temps suffisamment longue entre la formulation de l'intention et la réalisation de l'action, période au cours de laquelle la personne est absorbée par une ou des tâches concurrentes. L'une des tâches typiquement utilisées en recherche consiste à apprendre des lettres, des mots ou des non-mots projetés sur un moniteur d'ordinateur jusqu'à ce que la cible prospective apparaisse. Au plan théorique, cette procédure demande au participant d'être vigilant à la tâche concurrente qui est présentée comme étant l'objet principal de la recherche, mais qui en fait est une

tâche secondaire pour le chercheur (McDaniel & Einstein, 2000; Smith, 2003), la tâche « sous observation » (ou principale) étant celle de mémoire prospective.

L'intérêt croissant porté à la mémoire prospective a permis d'apporter des idées intéressantes sur le plan de la mesure (Titov & Knight, 2001). Ainsi, les plus anciennes tâches (et probablement les plus largement utilisées en recherche) requièrent de se rappeler d'intentions relativement simples telles que de retourner au chercheur une carte postale (Banville & Nolin, 2000; Lay, 1988), de faire un appel téléphonique (West, 1988) ou de dire quelque chose au chercheur en réponse à un indice (Meacham & Colombo, 1980). Bien que ces tâches aient permis d'observer des différences significatives entre certains groupes (p. ex. : entre jeunes et âgés), leur portée clinique est très limitée (Titov & Knight, 2001) pour différentes raisons : 1) plusieurs procédures exigent une seule réponse, générant ainsi un petit nombre d'observations, ce qui rend la mesure peu sensible parce qu'il n'y a pas suffisamment de variance; 2) plusieurs tâches prospectives conduites à l'extérieur du laboratoire (p. ex. : la carte postale) manquent de contrôle expérimental d'où les problèmes d'interprétation et de fiabilité observés; 3) peu de tâches utilisées ont su démontrer leur pouvoir prédictif, ce qui en fait des conditions d'évaluation d'une portée clinique limitée.

De toute évidence, puisque ces épreuves de laboratoire sont présentées de façon indépendante des activités de la vie quotidienne, leur plus importante limite concerne les lacunes observées au plan de la validité écologique (Raspelli et al., 2009). En effet,

toutes ces tâches sont apparues artificielles sur plusieurs plans. D'abord, l'évaluateur sélectionne les cibles prospectives pour le participant plutôt que de le laisser s'organiser par lui-même. Ensuite, ces tâches de mémoire prospective ne reflètent pas la vie quotidienne, ce qui limite la généralisation des interprétations et des conclusions dans le but de prédire le fonctionnement quotidien (Ellis & Kvavilashvili, 2000). Enfin, il importe également de tenir compte de ce qui est nommé en anglais comme un « *generation effect* », qui renvoie au phénomène selon lequel les personnes ont un meilleur taux de réussite lorsque les intentions et les plans sont autogénérés en comparaison au matériel généré par les autres (Bertsch, Pesta, Wiscott, & McDaniel 2007). Par exemple, une consigne qui demande de téléphoner au chercheur à un moment précis de la journée peut permettre un bon contrôle expérimental, mais ne produit pas le même niveau de motivation que lorsque le participant veut se souvenir d'appeler un ami pour aller au cinéma.

Les tâches de type 4 regroupent principalement des tests de type papier-crayon dont la valeur est reconnue comme étant écologique, dans le but d'évaluer la mémoire prospective. Dans cette catégorie, six principales tâches ont été répertoriées : 1) des items du *Rivermead Behavioural Memory Test* (RBMT) de Wilson, Cockburn et Baddeley (1985), 2) le *Prospective Memory Screening test (PROMS)* de Sohlberg, Mateer et Geyer (1985), 3) le *Memory Intention Screening Test* (MIST) de Raskin et

Buckheit (1998; 2001), 4) le *Prospective Remembering Video Procedure* (PRVP)¹ de Titov et Knight (2000; 2001), 5) le *Cambridge Test of Prospective Memory* (CAMPROMT) de Wilson et al., (2005) et 6) le *Modified Six Element Test* de Wilson et al., (1996). Concernant ce dernier test, habituellement connu pour évaluer les fonctions exécutives, Sock et Vaxelaire (2004) ont mentionné qu'il constitue l'une des rares tâches standardisées, calquée sur une situation de la vie réelle, permettant de solliciter de manière spécifique la mémoire prospective. Dans le même ordre d'idées, Burgess (2000) a rapporté que le MSET sert à évaluer une situation de *Multitasking* incluant de fortes composantes en lien avec la mémoire prospective aussi bien qu'en lien avec la planification. Le Tableau 1 présente une description sommaire de la nature de ces épreuves.

Thöne-Otto et Walther (2008) ont rapporté que le RBMT était le seul outil d'évaluation permettant d'étudier la mémoire prospective avant 2005. Toutefois, après avoir recensé les études portant sur l'évaluation de la mémoire prospective, il a été possible de constater qu'au cours de la même année, Solberg et al., (1985) avaient élaboré le *Prospective Memory Screening Test* afin d'évaluer les difficultés de mémoire prospective auprès des personnes ayant un traumatisme craniocérébral.

¹ Potvin, Rouleau, Audy, Charbonneau & Giguère (2011) ont élaboré une version francophone basée sur la procédure de Titov & Knight (2000) : le test écologique de mémoire prospective (TEMP).

Tableau 1

Description des outils d'évaluation de la mémoire prospective inclus dans le type 4 de Phillips et al. (2008)

Test	Description
<i>Rivermead Behavioural Memory Test</i> (RBMT) de Wilson, Cockburn et Baddeley (1985).	<ul style="list-style-type: none"> • Le RBMT est une batterie d'évaluation de la mémoire à valeur écologique. Il a été développé afin de permettre le dépistage des problèmes mnésiques de la vie quotidienne. • Le RBMT est composé de 12 items de mémoire voulant recréer le quotidien, dont trois sollicitent la mémoire prospective : <ul style="list-style-type: none"> ○ Rappel d'un objet personnel caché; ○ Rappel d'un rendez-vous : une alarme est programmée pour sonner 20 minutes plus tard; ○ Rappel de déposer un message : une enveloppe est déposée lors de l'épreuve de rappel d'un court trajet.
<i>Prospective Memory Screening test</i> (PROMS) de Sohlberg et Mateer (1985).	Cet outil a été développé afin d'évaluer les capacités d'une personne ayant subi un traumatisme craniocérébral à élaborer et à engager des actions planifiées de façon appropriée. Les items couvrent les types de rappel <i>event-based</i> et <i>time-based</i> .
<i>Memory Intention Screening Test</i> (MIST) de Raskin et Buckheit (2000).	Ce test comprend huit tâches de mémoire prospective. La moitié des tâches exigent des réponses verbales : « Dites-moi que c'est le temps de prendre une pause. » et l'autre moitié requiert une action telle que « d'écrire votre nom sur ce papier ». De plus, il y a 4 tâches de type <i>time-based</i> et 4 tâches de type <i>event-based</i> .
<i>Prospective Remembering Video Procedure</i> (PRVP) de Titov et Knight (2000).	Évaluation de la mémoire prospective selon des tâches de type <i>event-based</i> . Le participant observe une bande vidéo d'une durée de cinq minutes et il doit se souvenir de réaliser certaines actions, qu'il exprime verbalement, lorsque les indices prospectifs se présentent à lui au cours du visionnement.

Tableau 1

Description des outils d'évaluation de la mémoire prospective inclus dans le type 4 de Phillips et al. (2008) (suite)

Test	Description
<i>Cambridge Test of Prospective Memory</i> (CAM-PROMT) de Fleming, Kennedy, Fisher, Gill, Gullo et Shum (2009).	Trois tâches de type <i>event-based</i> (p. ex. : « Lorsque vous m'entendrez dire qu'il vous reste cinq minutes, SVP donnez-moi cette enveloppe qui contient un message. ») et trois de type <i>time-based</i> (p. ex. : « Dans sept minutes, vous devez interrompre ce que vous êtes en train de faire pour débuter ou continuer une autre tâche. ») doivent être complétées dans une période de 25 minutes. La tâche concurrente consiste à réaliser des tests de type papier-crayon. Le participant peut utiliser toutes les stratégies mises à sa disposition pour l'aider à se rappeler les tâches de mémoire prospective.
<i>Modified-Six Element Test</i> (MSET) de Wilson, Alderman, Burgess, Emslie et Evans (1996).	Le MSET comprend six « sous-tâches ». Chacune des épreuves est divisée en deux parties équivalentes nommées A et B. La première tâche consiste à décrire oralement le trajet emprunté, du domicile jusqu'au lieu de la passation du test et vice et versa : l'aller équivaut à la partie A et le retour à la partie B. La seconde tâche consiste à résoudre des problèmes arithmétiques (de niveau primaire) alors que la troisième consiste à nommer des images. Le participant doit entreprendre au moins quelques problèmes de chaque partie du test pendant la période des 10 minutes allouées; il doit également respecter un certain nombre de règles arbitraires telles que ne pas faire consécutivement la partie A puis la partie B d'une même épreuve.

Par la suite, ce test a été modifié par Raskin et Buckheit (1998) afin d'élargir son système de cotation et devenir le *Prospective Memory Test*. Dans la poursuite de leurs travaux visant la validation de cet outil, les auteurs ont rebaptisé le *Prospective Memory*

Test qui est maintenant reconnu comme étant le *Memory Intention Screening Test* (Raskin & Buckheit, 2000).

Les auteurs des épreuves mentionnées précédemment ont tenu à construire des tests standardisés, utiles pour une évaluation clinique de la mémoire prospective. Ceci a conduit plusieurs d'entre eux à présenter les analyses psychométriques de leurs outils (RBMT, CAM-PROMT, MIST et PRVP). D'autres épreuves, en plus de leurs qualités psychométriques reconnues, ont été normalisées auprès de personnes ayant une problématique spécifique telle qu'un traumatisme craniocérébral, un accident vasculaire cérébral, etc. (RBMT, MSET, MIST, PROMS). Certaines épreuves exigeaient de s'organiser par soi-même afin de réaliser un plan d'action (MSET). Toutefois, plusieurs lacunes ont été retrouvées au plan psychométrique, malgré les efforts significatifs faits sur ce plan. Tout d'abord, il apparaît pertinent de remettre en question le système de cotation de certains tests qui ne présente pas suffisamment de sensibilité pour permettre de détecter les déficits prospectifs subtils (p. ex. : échelle de cotation 0-1 du RBMT [*screening score*]). D'autres tests ont confondu la réalisation immédiate de l'intention et la mémoire prospective avec des tâches présentant des délais de rappel aussi courts qu'une ou deux minutes (p. ex. : PROMS) ou sans tâche concurrente (p. ex. : PRVP). Enfin, on peut remettre en question la validité de certains tests car la mesure n'est pas cohérente avec le construct théorique de la mémoire prospective (p. ex. : le PRVP qui sollicite peu les composantes exécutives de la mémoire prospective).

Les tâches de type 3 peuvent se répartir en deux catégories distinctes, soit les tâches réalisées dans un environnement réel et celles réalisées dans un environnement virtuel. Dans la première catégorie, un seul test a été recensé, soit le *Multiple Errand Test* (MET), qui existe sous trois différentes versions : version originale (Shallice et Burgess, 1991), version hôpital (MET-HV de Knight, Alderman, & Burgess, 2002) et version centre d'achats (MET-SV d'Alderman, Burgess, Knight, & Henman, 2003). Le MET, dans toutes ses versions, est un outil d'évaluation du *Multitasking*. Plus spécifiquement, ce concept est soutenu par trois principaux construits cognitifs : la mémoire, « l'intentionnalité » (ce qui implique largement la mémoire prospective) et la planification (Burgess, 2000). Le Tableau 2 présente une description sommaire de la nature de ces épreuves.

Le *Multiple Errand Test* présente trois principales forces méthodologiques : 1) il est écologique parce que l'épreuve s'administre dans le quotidien; 2) il est réaliste puisque la tâche est plausible et requiert du participant la formulation de ses propres plans tout comme la gestion des imprévus; 3) il met l'accent sur le *multitasking* en forçant le participant à gérer plusieurs tâches consécutives, ce qui consolide la valeur écologique et l'aspect réaliste du test. Selon Burgess et al. (2006), le MET (dans toutes ses versions) a démontré une bonne validité écologique, puisqu'il a été éprouvé dans la vie réelle et qu'il requiert l'exécution d'actions familières pouvant se répéter dans le quotidien. Toutefois, le plus grand désavantage du MET réside dans la difficulté de prévoir ou de

Tableau 2

Description des outils d'évaluation de la mémoire prospective (et du multitasking) selon le type 3 de Philips et al. (2008) – environnement réel

Test	Description
<i>Multiple Errand Test</i> (MET) de Shallice et Burgess (1991).	<ul style="list-style-type: none"> • L'objectif visé est de permettre au participant de s'engager dans un certain nombre de tâches à l'intérieur de situations où des événements mineurs et des imprévus peuvent survenir. • La personne doit réaliser six tâches très simples (p. ex. : acheter un pain brun, acheter un paquet de pastilles pour la gorge, etc.). La septième tâche exige que le participant se présente à un endroit déterminé 15 minutes après avoir commencé la tâche. La huitième tâche est plus exigeante car un ensemble de quatre informations doit être écrit sur une carte postale. • Les participants doivent s'engager dans chaque tâche en respectant des règles arbitraires.
<i>MET-Hospital Version</i> (HV) de Knight, Alderman et Burgess (2002).	<ul style="list-style-type: none"> • Validée au St Andrew's Hospital. Les tâches ont été simplifiées par rapport au MET original. Le participant doit atteindre six buts spécifiques et écrire quatre informations précises sur une carte. Il doit également rencontrer le chercheur à l'extérieur de l'hôpital, près de la réception, 20 minutes après le début du test.
<i>MET-Shopping Version</i> (SV) Alderman, Burgess, Knight et Henman (2003).	<ul style="list-style-type: none"> • L'exercice consiste en un ensemble de quatre tâches simples analogue à celles du MET original. Au total, douze sous-tâches sont présentées au participant, dont acheter six articles spécifiques. • Les règles arbitraires passent de six à neuf par rapport au MET original.

graduer les imprévus, particulièrement ceux de nature sociale. Ceci rend la standardisation de l'épreuve relativement difficile. De plus, il apparaît peu efficient de conduire de telles évaluations dans les milieux cliniques puisqu'elles mobilisent des ressources humaines sur une trop longue période de temps dans un contexte socioéconomique de rareté des ressources.

À la lumière des études précédentes, il est possible de conclure que la principale problématique vécue actuellement, sur le plan de l'évaluation neuropsychologique de la mémoire prospective, a trait à la standardisation de procédures regroupant des tâches connues, naturelles et plausibles dans le quotidien. En effet, comme Morris, Kotisa, Bramham, Brooks et Rose (2002) le rapportaient, le développement de tests écologiques a forcé des remaniements en termes de structure et de procédures d'évaluation. Toutefois, si la tâche est interactive et qu'elle implique des activités de la vie réelle (telles que celles retrouvées dans le MET), l'évaluateur fait face à un problème d'efficience, de standardisation et de reproductibilité des résultats, affectant ainsi la validité et la fidélité de l'outil. D'autre part, lorsqu'une tentative est faite pour ramener des tâches dites écologiques sous le format de tests de type papier-crayon (comme c'est le cas pour le MSET et le RBMT) ou lorsque des auteurs tentent de simplifier une tâche sous forme de tableau de jeu (p. ex. : *Virtual Planning* de Miotto & Morris, 1998), il y a une réduction importante du degré de pertinence et de validité écologique. L'épreuve perd ainsi de sa sensibilité aux dysfonctionnements neuropsychologiques, ce qui réduit par le fait même la portée pronostique et clinique de l'outil.

Afin de contourner ce type de difficultés, une alternative intéressante a émergé en sciences de la santé depuis le début des années 1990 : la « réalité virtuelle ». Cette technologie permet à l'évaluateur de tirer profit du meilleur des deux mondes (Morris et al., 2002), c'est-à-dire reproduire la vie réelle dans une condition de laboratoire (Wilson, Foreman, & Stanton, 1997). Elle permet ainsi de résoudre certains problèmes psychométriques, dont ceux concernant la validité écologique, la fidélité et la standardisation de la mesure. Au plan technique, la réalité virtuelle consiste à plonger une personne dans un environnement simulé par ordinateur. L'expérience en réalité virtuelle peut être vécue selon un mode non immersif ou un mode immersif. Dans le premier cas (non immersif), la personne est face à un écran d'ordinateur, une télévision ou face à un mur sur lequel l'environnement virtuel est projeté. Dans le deuxième cas (immersif), un effort est réalisé afin de permettre à la personne « d'entrer » dans l'environnement virtuel, que ce soit avec un visiocasque (*head mounted display*) ou mieux, une voûte immersive. Selon certains auteurs, l'immersion conférerait un aspect plus réaliste au protocole de recherche en optimisant le sentiment de présence¹ à l'environnement virtuel (Gorini, Capideville, De Leo, Mantovani, & Riva, 2011).

Selon Rand, Weiss, et Katz (2009a), les environnements virtuels ont été originalement utilisés en tant qu'outils d'intervention afin d'améliorer la performance cognitive lors de mises en situation compatibles avec le quotidien de la personne. Par

¹ Le sentiment de présence est défini plus loin dans cette thèse comme étant le sentiment d'être « réellement là », dans l'environnement virtuel (Sadowski & Stanney, 2002) comme s'il s'agissait d'un environnement réel.

exemple, des adolescents ayant des troubles graves d'apprentissage, qui ont été entraînés à faire des achats dans un supermarché virtuel, ont démontré leur capacité à réaliser les mêmes tâches dans la réalité en étant plus rapides que les participants qui ont utilisé d'autres outils d'apprentissage (Cromby, Standen, & Tasker, & Hartman-Maeir, 1996). Dans le même ordre d'idées, Katz et Hartman-Maeir (2005) ont démontré que des participants présentant une négligence visuospatiale consécutivement à un accident vasculaire cérébral ont développé la capacité de traverser une rue virtuelle de façon sécuritaire, ce qui s'est facilement transféré dans la réalité. Enfin, plusieurs exemples similaires à ceux-ci ont été rapportés dans des recherches réalisées auprès de clientèles de tous âges présentant des déficiences spécifiques, que ce soit motrice, visuelle ou auditive (Boian, Sharma, Han, Merians, Burdea, Adamovich, Recce, Tremaine, & Poizner, 2002; Bryanton, Bossé, Brien, McLean, McCormick, & Sveistrup, 2006; Das, Grimmer, Sparnon, McRae, & Thomas, 2005; Kuttuva et al., 2006; Passig & Eden, 2001; Reid, 2002; Weiss, Naveh, & Katz, 2003).

La réalité virtuelle, utilisée en tant qu'outil d'évaluation, apparaît comme étant très prometteuse pour la neuropsychologie en raison de sa capacité à créer un milieu immersif dynamique aux stimuli tridimensionnels dont l'interactivité est immédiate. Elle offre également la possibilité de paramétriser les stimuli présentés, de graduer les niveaux de difficulté ainsi que de mesurer avec précision les réponses et les comportements subtils de la personne relativement à la fonction ciblée (Parsons et al., 2008). La réalité virtuelle peut également compenser les déficits sensoriels et moteurs de la personne, de

même qu'elle peut favoriser son engagement et sa motivation. Au plan thérapeutique, cette technologie propose des tâches réalistes et sécuritaires, applicables dans un contexte de réadaptation (Raspelli et al., 2000). De plus, elle améliore les possibilités de transfert et de généralisation dans le quotidien (Rizzo & Kim, 2005). En bref, la réalité virtuelle offre des opportunités d'évaluation et de traitement qui ne sont pas disponibles avec l'utilisation de méthodes d'évaluation traditionnelles (Gould, Holmes, Fantie, Luckenbaugh, Pine, & Gould, 2007; Matheis, Schultheis, Tiersky, Deluca, Millis, & Rizzo, 2007; Parslow, Morris, Fleminger, Rahman, Abrahams, & Recce, 2005; Phelps, Fritchle, & Hoffman, 2004) ou avec l'application d'une méthode d'évaluation dans le milieu réel de la personne.

Les tâches de type 3, utilisant la réalité virtuelle comme outil d'évaluation, ont proposé des environnements immersifs reconnus pour leur valeur écologique (Parsons et al., 2008; Rizzo, Buckwalter, Bowerly, Van Der Zaag, Humphrey, Neumann, Chua, Kyriakakis, Van Rooyen, & Sisemore, 2000). Globalement, les environnements virtuels développés pour l'évaluation des fonctions cognitives ont visé l'étude des processus attentionnels (Parsons, Rizzo, Bamattre, & Brennan, 2007; Rizzo, Bowerly, Buckwalter, Klimchuk, Mitura, & Parsons, 2006), des habiletés spatiales (Parsons et al., 2005), des habiletés d'apprentissage et de mémoire (Brooks, Rose, Potter, Jayawardena, & Morling, 2002; Matheis et al., 2007; Sweeney, Kersel, Morris, Manly, & Evans, 2010) ainsi que l'étude des fonctions exécutives (Elkins, Rubin, Rosenthal, Skoff, & Prather, 2001; Law,

Logie, & Pearson, 2006; McGeorge, Phillips, Crawford, Garden, Della Sala, & Milne, 2001).

En ce qui concerne la mémoire prospective, onze environnements virtuels ayant été utilisés auprès de clientèles multiples ont été répertoriés. Il est possible de classer les tâches réalisées dans ces environnements en deux principaux types : 1) les tâches de mémoire prospective réalisées dans un appartement virtuel consistant à déménager du matériel et 2) les tâches des fonctions exécutives basées sur une tâche de magasinage et qui évaluent soit la planification de l'action (*action planning*), soit le *multitasking* par une adaptation du MET. Les seuls tests basés sur un paradigme de planification de l'action ou de *multitasking* qui ne sont pas réalisés dans un centre d'achats ou une boutique virtuelle sont le *Virtual Action Planning* de Zalla, Plassiart, Pillon, Grafman, et Sirigu (2001), lequel se déroule dans un appartement virtuel et le *Virtual Errand Test* de McGeorge et al. (2001) qui se déroule dans une université virtuelle. Le Tableau 3 présente sommairement ces tâches.

Même si toutes ces études ont été réalisées selon une approche de vérisimilitude, seules certaines d'entre elles ont tenté de faire une comparaison entre les mesures prises en réalité virtuelle et les mesures dites de la vie quotidienne (Cromby et al., 1996; Lee et al., 2003; McGeorge et al., 2001; Rand, Basha-Abu, Weiss, & Katz, 2009b). Par ailleurs, quelques études ont tenté d'utiliser l'environnement virtuel pour décrire de manière qualitative les difficultés de certaines clientèles (Lee et al., 2003) alors que d'autres ont.

Tableau 3

Description des outils d'évaluation de la mémoire prospective et du multitasking selon le type 3 de Philips et al. (2009) - environnements virtuels

Environnement virtuel	Auteurs	Description
<i>Virtual Bungalow</i>	Morris, Kotitsa, Bramham, Brooks et Rose (2002).	<ul style="list-style-type: none"> Appartement virtuel contenant quatre pièces à l'intérieur desquelles le participant peut naviguer à l'aide d'un <i>joystick</i>. Lors de l'évaluation, il est informé de la tâche « du déménagement », un scénario selon lequel il devient une « aide aux déménageurs ». Il doit rassembler les meubles et autres objets d'une façon spécifique.
	Brooks, Rose, Potter, Jayawardena et Morling (2004).	<ul style="list-style-type: none"> Les participants devaient mettre une étiquette « <i>to go</i> » sur les articles à déplacer en identifiant la bonne pièce. Pendant la réalisation de cette tâche concurrente, le participant devait également réaliser trois tâches distinctes de mémoire prospective soit : 1) <i>activity-based</i> (p. ex. : « Demandez à l'expérimentateur de fermer la porte de la cuisine chaque fois que vous en sortez afin de ne pas laisser sortir le chat. »), 2) <i>event-based</i> (p. ex. : « Demandez à l'expérimentateur de mettre une note « <i>fragile</i> » sur les articles en verre. ») et 3) <i>time-based</i> (p. ex. : « Demandez à l'expérimentateur d'appuyer sur le bouton rouge près de l'horloge toutes les 5 minutes afin de permettre aux déménageurs d'entrer dans le bungalow »).
	Attree, Dancey et Pope (2009).	
	Sweeney, Kersel, Morris, Manly et Evans (2010).	

Tableau 3

Description des outils d'évaluation de la mémoire prospective et du multitasking selon le type 3 de Philips et al. (2009) - environnements virtuels (suite)

Environnement virtuel	Auteurs	Description
<i>Virtual action planning</i>	Zalla, Plassiart, Pillon, Grafman et Sirigu (2001).	<ul style="list-style-type: none"> Appartement virtuel visant l'évaluation des capacités de planification. Dans la première condition, les participants devaient générer verbalement la séquence d'actions correspondant à la planification d'une routine matinale pouvant se réaliser dans l'appartement virtuel. Simultanément, l'expérimentateur exécutait avec la souris les actions que le sujet exprimait et les plans qu'il générait. Dans la condition exécution de l'action, le sujet exécutait de lui-même, dans l'environnement virtuel, la séquence d'actions de la nouvelle routine ciblée (se préparer pour aller travailler).
<i>Virtual Action Planning – Supermarket (VAP-S)</i>	Klinger, Chemin, Lebreton et Marié (2006). Rabinowitz, Klinger, Korczyn et Josman (2009).	<ul style="list-style-type: none"> Outil d'évaluation basé sur le « <i>shopping list test</i> » ou le test des commissions de Martin (1972). Supermarché virtuel dans lequel les participants devaient acheter des articles inscrits sur une liste. Ils devaient également respecter plusieurs règles dont ne pas acheter deux fois le même article, choisir une caisse près de laquelle il y a un caissier, sortir du centre d'achat une fois la tâche terminée, etc.

Tableau 3

Description des outils d'évaluation de la mémoire prospective et du multitasking selon le type 3 de Philips et al. (2009) - environnements virtuels (suite)

Environnement virtuel	Auteurs	Description
<i>V-Store</i>	LoPriore, Castelnovo et Liccione (2003).	<ul style="list-style-type: none"> Utilisé en réadaptation des fonctions exécutives. Il s'agit d'un marché de fruits virtuel à l'intérieur duquel les participants devaient accomplir une tâche analogue au WCST et à la Tour de Londres. Cette tâche comprenait six niveaux croissant en complexité, chacun comprenant 10 tâches.
	Castelnovo, LoPriore, Liccione et Cioffi (2003).	<ul style="list-style-type: none"> La tâche consistait à remplir des paniers avec des fruits localisés sur quatre étagères disposées le long des murs. Au commencement de chaque niveau du test, une commande verbale est lancée à travers un haut-parleur. Une série d'éléments distracteurs étaient ajoutés dans le but de générer une pression, un stress au plan de la gestion du temps; ceci permettait de mettre en évidence les stratégies de gestion de la tâche.
<i>Virtual supermarket</i>	Cromby, Standen, Newman et Tasker (1996).	<ul style="list-style-type: none"> Tâche de magasinage (<i>virtual shopping task</i>) au cours de laquelle des jeunes ayant des troubles d'apprentissage s'entraînaient.
	Lee, Ku, Cho, Hahn, Kim, Lee, Kang, Kim, Yu, Wiederhold, Wiederhold et Kim (2003).	<ul style="list-style-type: none"> La tâche principale consistait à prendre tous les aliments qui sont dans l'épicerie et de les mettre dans le panier.

Tableau 3

Description des outils d'évaluation de la mémoire prospective et du multitasking selon le type 3 de Philips et al. (2009) - environnements virtuels (suite)

Environnement virtuel	Auteurs	Description
<i>Virtual Errand Test</i>	McGeorge, Phillips, Crawford, Garden, Della Sala et Milne (2001). Law, Logie et Pearson (2006).	<ul style="list-style-type: none"> L'environnement virtuel reproduit les trois étages du Département de psychologie de l'Université d'Aberdeen. La tâche est d'une durée de 20 minutes, au cours desquelles les participants doivent réaliser un maximum de 12 commissions. Le degré de complexité et d'importance des tâches varie et certaines commissions devaient être complétées à des moments spécifiques. Dans la modification de Law et al. (2006), pendant la réalisation des commissions, les participants sont en double tâche.
<i>V-Mall</i>	Rand, Katz, Shahar, Kizony et Weiss (2005).	<ul style="list-style-type: none"> Le <i>V-Mall</i> simule un centre d'achats à l'intérieur duquel il est possible d'avoir accès à plusieurs boutiques. Les participants reçoivent une liste de six articles qu'ils doivent acheter. Ces produits sont localisés dans deux différentes allées dans le haut et le milieu des étagères.
<i>Virtual multiple errand test</i>	Rand, Rukan, Weiss et Katz (2009b)	<ul style="list-style-type: none"> Adaptation du <i>MET-Shopping Version</i> d'Alderman et al. (2003). Utilise le <i>V-Mall</i>
<i>Virtual multiple errand test</i>	Raspelli, Carelli, Morganti, Albani, Pignatti, Mauro, Poletti, Corra, Silani et Riva (2009).	<ul style="list-style-type: none"> Adaptation du <i>MET-Shopping Version</i> d'Alderman et al. (2003).

voulu valider son potentiel thérapeutique (Cromby et al., 1996; Rand, Katz, Shahar, Kizony, & Weiss, 2005; Rand et al., 2009a). Toutefois, dans la majorité des études recensées, l'objectif visé était surtout de mettre en lumière les différences qui existent entre les personnes ayant des conditions de santé spécifiques (p. ex. : accident vasculaire cérébral, traumatisme craniocérébral, maladie de Parkinson, fibromyalgie, etc.) et celles qui n'en ont pas (Attree, Dancey, & Pope, 2009; Brooks et al., 2004; Klinger, Chemin, Lebreton, & Marié, 2006; Morris et al., 2002; Sweeney et al., 2010; Zalla et al., 2001). La plupart des résultats obtenus ont souligné le « potentiel de discrimination » des environnements virtuels, car tous les participants des groupes dits « cliniques » performaient moins bien lorsque comparés à l'échantillon témoin. Il est toutefois important de mentionner qu'il ne s'agit pas ici d'études portant sur la validité convergente, car les auteurs n'ont pas réalisé d'analyses corrélationnelles entre les mesures prises en réalité virtuelle et celles correspondant aux épreuves neuropsychologiques traditionnelles.

Au terme de cette revue des environnements virtuels utilisés aux fins d'évaluation de la mémoire prospective, il a été constaté que les études n'étaient pas toutes équivalentes au plan méthodologique. En effet, certains échantillons sont si petits qu'ils soulèvent un questionnement sur la validité des résultats dans une optique de généralisation (Klinger et al., 2006; Raspelli et al., 2010; Zalla et al., 2001). Par ailleurs, certains environnements virtuels présentés comme étant des outils utilisés en clinique n'ont fait l'objet d'aucune analyse en ce qui a trait à leur validité ou à leur fidélité

(Castelnuovo, Lo Priore, Liccione, & Cioffi, 2003; Lee et al., 2003; LoPriore, Castelnuovo, & Liccione, 2003). Enfin, il est important de mentionner qu'en voulant complexifier une tâche écologique valide, Law et al. (2006) ont rendu artificiel le *Virtual Errand Test* (VET) par l'ajout d'une procédure de laboratoire ciblant la mémoire de travail.

Au plan de l'évaluation de la performance des participants, les indices les plus utilisés dans la construction des scores sont le bris de règles, les déficits dans la formulation de stratégies, le temps de réalisation, le nombre et le type d'erreurs, la précision et la réussite ou l'échec dans le rappel de l'intention. La notion d'efficience est ressortie fréquemment comme étant une mesure sensible aux problématiques étudiées. Enfin, dans certaines études, il est aussi apparu que les items *time-based* (Attrée et al., 2009; Brooks et al., 2004) et parfois *activity-based* (Attrée et al., 2009) n'étaient pas suffisamment sensibles pour détecter les déficits de mémoire prospective chez les personnes présentant soit une fibromyalgie, soit un accident vasculaire cérébral.

En somme, il est apparu que la plupart des études n'ont pas été réalisées dans le but d'effectuer des analyses psychométriques des scores obtenus en réalité virtuelle. Toutefois, il est possible de retrouver cinq études pouvant être qualifiées de « plus rigoureuses » sous l'angle de la validation de la mesure. Les trois premières ont porté sur la validité convergente de l'outil, alors que les deux autres ont traité de sa validité écologique.

L'étude de Sweeney et al. (2010) a tenté de comparer les scores obtenus en réalité virtuelle au MSET ainsi qu'au *Dysexecutive questionnaire* (DEX), tous les deux issus du BADS. Les corrélations obtenues n'étaient pas significatives, ce qui indique que les mesures prises dans l'environnement virtuel ne correspondaient pas aux concepts de *multitasking* tels qu'évalués par le MSET ou aux comportements pouvant être décrits par le questionnaire (DEX). Ces auteurs ont également effectué des analyses visant à évaluer la sensibilité et la spécificité de la tâche prospective. Les résultats sont apparus relativement modestes, à un tel point que la nature ou la présence des troubles dysexécutifs des participants ayant un traumatisme craniocérébral ont été remises en question par les auteurs.

Lorsque Werner, Rabinowitz, Klinger, Korczyn et Josman (2009) ont repris le *Virtual Action Planning – Supermarket* (VAP-S) de Klinger et al. (2006) auprès de la clientèle ayant un déficit cognitif léger (*Mild Cognitive Impairment* (MCI)), la démarche de validation a consisté à comparer l'outil (le VAP-S) au *Profile Score* du BADS. Les auteurs ont alors trouvé des corrélations élevées et significatives entre le BADS et quatre des huit indices du VAP-S. Ils ont également démontré la contribution du VAP-S dans le classement des participants dans un groupe selon qu'ils aient un MCI ou qu'ils soient des participants témoins.

L'étude de Raspelli et al. (2009), qui est plutôt exploratoire, a démontré des corrélations significatives entre le V-MET et certaines épreuves neuropsychologiques

traditionnelles mesurant la planification (Tour de Londres), la mémoire de travail non verbale (test de Corsi), la fluidité verbale (*Semantic & Phonemic Fluency*) et la mémoire des mots (*Word Recall Test*). Toutefois, le nombre restreint de participants¹ combiné aux nombreuses mesures prises permet de se questionner sur la validité des corrélations obtenues sur la base des analyses de puissance statistique.

Dans le cadre d'une démarche de validation écologique, McGeorge et al. (2001) ont comparé la performance des participants au VET à la performance aux mêmes tâches réalisées dans l'environnement réel. Ils ont observé une corrélation significative élevée entre les mesures, confirmant ainsi que l'environnement virtuel pouvait être utilisé comme mesure sensible du fonctionnement réel de la personne dans son quotidien. Par contre, sur le plan de la validité de contenu, la représentativité de ce test, en regard de la vie réelle, est questionable, les tâches étant plutôt artificielles et réalisées dans un contexte qui ne peut pas être généralisé à l'ensemble de la population (voir tableau 3).

Pour leur part, Rand et al. (2009b) ont soumis des participants ayant subi un accident vasculaire cérébral au V-MET de même qu'au MET-HV. Dans le cadre de cette étude, ils ont démontré la valeur écologique du V-MET dont les corrélations avec les indices du MET-HV sont élevées et significatives. Le V-MET de Rand et al. (2009b) constitue actuellement l'outil le plus fiable d'un point de vue écologique et

¹ L'échantillon expérimental incluait cinq personnes ayant la maladie de Parkinson ainsi que quatre personnes ayant été victimes d'un accident vasculaire cérébral. La performance de ces participants a été comparée à celle de 14 personnes âgées entre 50 et 70 ans, sans antécédent neurologique.

psychométrique pour évaluer la mémoire prospective ainsi que le *multitasking*. Toutefois, d'un point de vue clinique, l'utilisation du système IREX, avec lequel il est possible d'accéder au V-MET, est une limite en soi. En effet, il s'agit d'un imposant système, peu mobile et dispendieux, ce qui en fait un outil peu accessible pour les utilisateurs. De plus, étant donné qu'il s'agit d'un système non immersif, il y a une perte importante de réalisme dans l'environnement virtuel, pouvant diminuer le sentiment de présence. Par ailleurs, toutes les études présentées ici sont non immersives à l'exception du *V-Store* (LoPriore et al., 2003) et du V-MET de Raspelli et al. (2009). Ce dernier est probablement l'outil le plus prometteur, car il peut fonctionner grâce à un simple ordinateur portable, ses environnements virtuels sont gratuits et il permet l'immersion grâce à un visiocasque.

Tel qu'il a été possible de le voir dans cette section, l'évaluation de la mémoire prospective, dans une perspective écologique, présente des défis de taille. Les épreuves qui sont réalisées dans le milieu réel, tel que le MET, semblent être les plus valides actuellement, du point de vue du construit théorique de la mémoire prospective. En visant la vérisimilitude, ce type de test maximise les possibilités de généralisation et suggère que les résultats obtenus et les observations réalisées se rapprochent davantage de la réalité quotidienne de la personne. Toutefois, les problèmes de standardisation et de fidélité inhérents à ce type d'outil constituent des limites importantes d'un point de vue psychométrique. Ainsi, il semble que les environnements virtuels laissent entrevoir un espoir de contourner ces difficultés en combinant vérisimilitude et standardisation. La

réalité virtuelle pourrait ainsi devenir une approche plus « puissante », plus « précise » ou plus « juste » au plan de la mesure afin d'évaluer la mémoire prospective chez des clientèles présentant des déficits neurologiques.

La prochaine section présente une pathologie acquise qui perturbe de manière importante la mémoire prospective et, par extension, l'autonomie de la personne dans son quotidien. Il s'agit du traumatisme craniocérébral, régulièrement décrit comme étant une épidémie silencieuse.

SECTION 3 : LE TRAUMATISME CRANIOCÉRÉBRAL

Le traumatisme craniocérébral (TCC) a longtemps constitué l'une des principales causes de désordre neurologique (Helps, Henley, & Harrison, 2008), étant même qualifié d'épidémie silencieuse (Vaishnavi, Rao, & Fann, 2009) par plusieurs organismes de santé publique dans le monde. Il est généralement reconnu que « ce fléau » touche toutes les strates de la société, mais principalement les jeunes adultes âgés de 18 à 25 ans (Ponsford et al., 2008; Tate, Broe, Cameron, Hodgkinson, & Soo, 2005), affectant davantage les hommes que les femmes, dans une proportion de deux pour un (Kinsella, 2009). Les causes du TCC sont généralement reliées aux chutes, aux accidents de sports/loisirs ou aux accidents de la route (Helps, Henley, & Harrison cités par Kinsella, 2009).

Il est reconnu aujourd’hui que les lésions causées par le TCC entraînent une interruption du fonctionnement de la mémoire prospective (Bigler, 2001; Felmingham, Baguley, & Green, 2004). De plus, les contusions focales, plus fréquentes dans les régions frontales (Levin & Kraus, 1994), entraînent des déficits au plan de la vitesse de traitement de l’information, de la mémoire de travail, du fonctionnement exécutif et de la mémoire épisodique. Il est important de rappeler que ces fonctions sont directement impliquées dans la réalisation d’une intention dans le futur (Fleming, Riley, Gill, Gullo, Strong, & Shum, 2008; Kinch & McDonald, 2001).

Plusieurs recherches réalisées par le passé auprès des personnes ayant un traumatisme craniocérébral ont porté sur l’étude de la mémoire rétrospective. Invariablement, elles ont démontré que le TCC entraînait des déficits dans ce champ de la cognition (DeLuca, Schultheis, Madigan, Christodoulou, & Averill, 2000). Il existe également dans les écrits scientifiques un intérêt croissant pour l’étude de la mémoire prospective chez les personnes ayant été victimes d’un TCC. Ainsi, plusieurs auteurs se sont intéressés aux effets des dysfonctions cognitives post-traumatiques sur la mémoire prospective. Au plan clinique, cette préoccupation est très importante puisque les dysfonctions exécutives affectant la mémoire prospective peuvent interférer à la fois avec l’autonomie, la socialisation, les tâches professionnelles et la sécurité de la personne. Dans le même ordre d’idées, il semble que l’évaluation post-traumatique de la mémoire prospective puisse contribuer à la qualité du pronostic en ce qui concerne la participation sociale des individus. Ainsi, l’une des plus importantes raisons de

considérer la mémoire prospective en tant qu'indicateur pronostique après un TCC est sa capacité à décrire les performances cognitives dans la vie quotidienne (Kinsella, 2009; Henry, Macleod, Phillips, & Crawford, 2004).

Plusieurs recherches réalisées auprès des personnes ayant un TCC ont démontré qu'elles avaient davantage de difficultés dans la réalisation de tâches prospectives comparativement aux échantillons témoins (Fleming et al., 2008; Groot et al., 2002; Kinch & McDonald, 2001; Kinsella et al., 1996; Kliegel, Eschen & Thone-Otto, 2004; Knight, Harnett & Titov, 2005; Mathias & Mansfield, 2005; Shum et al., 2002; Shum, Valentine, & Cutmore, 1999). La plupart des évaluations effectuées dans le cadre de ces recherches sont toutefois difficiles à utiliser dans le milieu clinique. En effet, il semble que les mesures prises lors de ces études aient peu à voir avec la vie quotidienne (Henry et al., 2004; Titov & Knight, 2001). Par conséquent, en dépit de l'intérêt croissant pour le sujet, la difficulté de trouver une mesure appropriée et reliée aux exigences de la vie réelle (tout en demeurant fiable au plan psychométrique) demeure très présente (Groot et al., 2002; Utzl, 2008). Selon Kinsella (2009), il existe actuellement des procédures d'évaluation en développement qui simuleraient des environnements naturels et des demandes réalistes. Toutefois, il demeure impératif, selon l'auteur, de développer un système normatif, tout en démontrant la validité de la mesure, afin d'établir une évaluation post-traumatique de la mémoire prospective cliniquement utile.

Cette section a démontré que la mémoire prospective est sensible aux atteintes cérébrales, notamment à celles consécutives à un traumatisme craniocérébral. Elle a mis en lumière que les déficits prospectifs peuvent avoir des effets importants sur l'autonomie de la personne tant au plan personnel, social que professionnel. Il a également été possible de voir que les préoccupations concernant une mesure sensible et spécifique de la mémoire prospective demeurent actuelles. Ainsi, malgré les innovations des dernières années réalisées par plusieurs chercheurs au plan psychométrique, l'élaboration de protocoles d'évaluation de la mémoire prospective selon une perspective écologique demeure toujours pertinente. Enfin, il est apparu que la réalité virtuelle est un outil à explorer en raison de son potentiel de produire une mesure fiable et valide à partir de protocoles standardisés dont le caractère apparaît comme étant écologiquement valide.

Au cours de cette introduction, il a été défini que la mémoire prospective représente les capacités d'une personne à réaliser une intention différée dans le temps. Il a également été exposé que les lobes frontaux jouent un rôle important dans le processus qui conduit de la formulation de l'intention jusqu'à sa réalisation en temps voulu. Les pages précédentes ont rapporté l'existence de plusieurs protocoles d'évaluation de la mémoire prospective selon trois principales modalités : l'évaluation traditionnelle de type papier-crayon, l'évaluation écologique menée dans le milieu réel et l'évaluation écologique menée par la réalité virtuelle. Au total, vingt-deux protocoles d'évaluation ont été analysés dans le cadre des travaux liés à cette thèse. À la lumière de cette revue

des évaluations disponibles à ce jour, il ressort que les études analysées présentaient plusieurs limites, que ce soit au plan théorique, méthodologique, statistique ou technologique.

Il a été également possible de voir que la clientèle présentant un TCC a été l'objet de plusieurs recherches, notamment parce que ce type de problématique représente une sorte « d'épidémie » tellement les cas sont nombreux, mais aussi parce que les lésions produites lors de l'accident interfèrent avec le bon fonctionnement des fonctions cognitives impliquées dans la mémoire prospective. De plus, en raison de l'importante contribution de la mémoire prospective à l'autonomie de la personne, des déficits prospectifs peuvent souvent provoquer des situations de handicap dans la vie quotidienne. Il devient donc impératif de cibler rapidement, dans le but d'établir un pronostic réaliste, ces problématiques par une évaluation clinique fiable et représentative des comportements tels qu'ils se produisent dans la vie quotidienne.

Un nouveau protocole d'évaluation des fonctions cognitives impliquées dans la mémoire prospective a été élaboré dans le cadre de cette thèse, tentant de contourner certaines difficultés mises en lumière par les précédentes recherches. L'immersion en réalité virtuelle représenterait un atout au plan de la mesure écologique, car elle pourrait favoriser la représentativité et la généralisation des tâches demandées conformément aux exigences du quotidien.

L'objectif général de cette recherche consistait à démontrer la pertinence d'évaluer la mémoire prospective par le biais de la réalité virtuelle, en mode immersif. Le choix de cette technologie, associée à l'évaluation neuropsychologique, est motivé par son caractère écologique, ses possibilités de standardisation et sa capacité à ne pas structurer la personne pendant la réalisation d'une tâche. Afin de réaliser cet objectif, les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont été regroupés en deux chapitres complémentaires. Le premier chapitre présente une étude méthodologique visant à démontrer la validité de critère de la tâche expérimentale d'évaluation de la mémoire prospective en réalité virtuelle. Pour ce faire, un protocole d'évaluation immersif voulant reproduire un contexte réaliste (sous l'angle de la vérisimilitude) a été comparé à des items de mémoire prospective nommés tâches fonctionnelles de type papier/ crayon (*functional 'paper and pencil' tasks*), tel que recommandé par Chevignard, Soo, Galvin, Catroppa et Eren (2012). La construction de ces items a été inspirée du RBMT, ce dernier étant décrit comme un test écologique s'apparentant davantage (dans son ensemble) au concept de la véridicalité. Plus spécifiquement, les hypothèses de recherche de cette première étude ont été libellées de la manière suivante :

- 1.1 Les résultats du protocole virtuel d'évaluation seront corrélés au score global de l'épreuve analogue au RBMT, nommée « fonctionnelle » et servant de critère dans ce processus de validité.
- 1.2 L'échelle de mesure du protocole virtuel d'évaluation aura une consistance interne acceptable (i.e. entre 0.70 à 0.85).

Pour sa part, l'étude présentée dans le deuxième chapitre a tenté de démontrer la sensibilité et la spécificité du protocole d'évaluation en réalité virtuelle en comparant la performance d'un groupe de personnes ayant subi un traumatisme craniocérébral à des participants témoins sains. Les hypothèses de recherche pour cette deuxième étude étaient les suivantes :

- 2.1 Les participants ayant un TCC fonctionneront moins bien à toutes les tâches de mémoire prospective (fonctionnelle et virtuelle) lorsqu'ils seront comparés aux participants témoins.
- 2.2 Le protocole d'évaluation combinant les mesures fonctionnelles et virtuelles aura un pouvoir de discrimination supérieur à 50 %.

Finalement, cette thèse se conclut par une discussion générale visant à discuter des problèmes méthodologiques rencontrés et à intégrer les résultats de la recherche aux cadres théoriques portant sur la mémoire prospective.



Chapitre I

**Elaboration of a procedure using virtual immersive technology for the assessment
of prospective memory and the study of its validity with healthy participants**

Title: Elaboration of a procedure using virtual immersive technology for the assessment of prospective memory and the study of its validity with healthy participants

Authors:

Frédéric Banville, M. A.

Université du Québec à Rimouski

Pierre Nolin, Ph. D.

Université du Québec à Trois-Rivières

Source of work:

This research forms part of the doctoral studies of the first author.

Correspondence:

Frédéric Banville,
Département des sciences infirmières
Université du Québec à Rimouski
300, allée des Ursulines, C.P. 3300, succ. A
Rimouski (Québec)
G5L 3A1
Tel.: 1-418-723-1986 # 1931
Fax.: 1-418-724-1450
frederic_banville@uqar.ca

Abstract

Traditional neuropsychological assessment is recognized as an effective means of determining an individual's cognitive profile. It does, however, have one main disadvantage: it lacks the ability to characterize cognitive impairment as it is experienced in everyday life. The resulting reduction in content "ecological" validity is especially apparent when it comes to detecting cognitive dysfunctions, like those related to prospective memory, which are characterized by a difficulty in remembering to carry out an action in the future. Currently, the literature tends to show the value of using virtual reality as a tool for examining cognitive disorders as part of an ecological approach to neuropsychological assessment. *Objective.* The objectives of this research were to elaborate a prospective memory assessment procedure that uses virtual reality (VR), and to study its validity and reliability. *Method.* Ninety-two healthy participants performed two types of prospective-memory tasks. The first were done with virtual reality, while the second involved two "functional tasks realized in the office." *Results.* Correlation analyses showed that there were few weak, non-significant relationships between the VR and functional tasks. Moreover, the reliability scores of the virtual and functional scales were weak. *Discussion.* The results suggested : 1) that the virtual protocol developed here didn't reach the recognized validity and reliability criterions and 2) that several and complex processes were involved in prospective memory. For these reasons, it is important to continue the research in developing the best prospective memory assessment protocols using virtual reality.

Keywords: Prospective memory, Virtual Reality, Healthy adult, Criterion validity.

Introduction

Prospective memory is a set of cognitive functions responsible for our ability to remember to carry out an intended action at a specific time in the future (Ellis, 1996). Prospective memory is largely ecological in nature. It is now recognized that proper functioning of the prospective memory is essential in everyday life; it gives people a maximum of independence in carrying out normal activities. By providing a certain degree of personal safety in everyday life, prospective memory also has a direct effect on people's quality of life and on their social participation. Some activities governed by prospective memory include remembering to take medication, arriving at an appointment on time and turning off the stove after using it (Shum, Fleming, & Neulinger, 2002).

At first glance, prospective memory seems a relatively simple concept: performing a concrete action at a specific time. However, the processes involved—from the planning of an action to its execution—are theoretically quite complex. Prospective memory involves a set of behaviours directed towards a goal (i.e. performing the action); these behaviours in turn necessarily involve executive functions (Stuss & Benson, 1986). These are essentially a set of high-level processes that control and regulate not only cognitive functions but also emotions and behaviours (Vriezen & Pigott, 2002; Stuss & Benson, 1986). The steps leading to the performance of the intended action depend heavily therefore, on the executive functions and, to a lesser extent, on episodic memory.

The processes involved in prospective remembering can be divided into four phases (Kliegel, Mackinlay, & Jäger, 2008): (a) formulating the intention, (b) retaining the intention during ongoing tasks, (c) self-initiating the intention at the end of the delay period, and (d) performing the action at the appropriate time. The first step draws on the individual's action-planning skills. The second step represents the ability to store information during the intention retention phase. The third phase underlines the importance of monitoring prospective target and managing interferences, inhibiting them as necessary. The fourth and final step involves executive functions of inhibition, self-regulation and activation and, to a lesser extent, episodic memory (i.e. remembering the content of the task to be executed) in order to realize correctly the previous encoded intention.

McDaniel and Einstein (2007) have described five components that should be present in the elaboration of prospective memory tasks. Firstly, the execution of the action should be delayed in the future. Secondly, in between the elaboration of the action plan and its execution, it is necessary to be engaged in a demanding ongoing task. This entails an additional or a secondary task which is embedded in the prospective memory process. For example, the traditional laboratory paradigm asks the participant to perform the task of determining whether letter strings are words or nonwords (ongoing task) and at the same time performing the task of pressing a specific key on a keyboard upon detection of a specific word (prospective memory task). Thirdly, the retention interval ought to be restricted. McDaniel and Einstein (2007) have said that all delayed tasks

aren't prospective. For example, a project to clean a garage is not a prospective memory task because this project could be realized in several steps and days. Fourthly, the range of time to execute the intended action should be limited: for example, the plan to read a book is not a prospective memory task. In other words, the beginning and end of an action have to be completed within a short delay. Fifthly, the intention has to have been planned at the beginning of the activity. For this reason, it is important to have an intention to realize after having completed or worked on an ongoing task that has mobilized physically or intellectually the individual (Burgess, Scott, & Frith, 2003).

Kvavilashvili and Ellis (1996) have described three types of remembering based on the nature of prospective cues: Event-based, Activity-based and Time-based. But, as mentioned by Pavawalla, Schmitter-Edgecombe, and Smith (2012), most experimental prospective memory tasks tend to be Event-based. Specifically, Event-based prospective memory tasks are facilitated when a cue is present in the environment. The best example is the person who wishes to buy orange juice on the way home: here prospective remembering "pops up" with the appearance of a grocery store. Activity-based prospective memory consist in achieving a specific action (for example, taking a medication) in association with the realization of another action (for example, when the person is going to the work). Finally, Time-based prospective memory tasks consist in remembering an intention at a specific time (e.g. 10 o'clock) or after a specific delay (e.g. in a 20-minute delay). A good example of a Time-based prospective memory event

is meeting a colleague at a specific time and day or removing a cake from the oven after 30 minutes.

McDaniel and Einstein (2000) have proposed a cognitive model in order to explain how prospective memory works, principally with Event-based cues. The Multiprocess Model has two main modes of remembering: automatic and strategic. Furthermore, the authors have made a distinction between two types of cues: focal and non-focal. The first type includes all the information needed to realize a delayed intention during the ongoing task. The second type of cue targets the information available in the environment that is not necessary for achieving the prospective memory task.

More specifically, when people achieve a prospective task under automatic processes, the contact with a focal cue in the environment is sufficient to remember the attended action. That is the result of an “involuntary” association between the mnestic system and the intention (McDaniel, Robinson-Riegler, & Einstein, 1998; McDaniel, Einstein, & Rendell, 2008). In this case, the frontal lobes are less active (but not inactive). In fact, this remembering could depend more on environment cues, thus soliciting more memory and attention than executive functions.

Strategic remembering implies bigger cognitive resources because it supposes a strategic and voluntary monitoring between ongoing and prospective tasks (McDaniel & Einstein, 2000). This process might be supported by the Supervisory Attention System

(SAS), an attention-executive process (Norman & Shallice, 1986). The SAS facilitates encoding an association between an external event and the intended action. After, the SAS monitors the environment and searches the targeted cue in order to indicate the right time to perform the action (Burgess & Shallice, 1997; Ellis, 1996). When the target is identified, the SAS interrupts the ongoing task, turns the attention toward the prospective task and lets the person realize the intended action. In summary, the role of the SAS in the Multiprocess model is to support the realization of the action plan by the activation of the intended scripts and by diminishing the non-pertinent scripts; this process could be implied also when the individual performs in attention mode.

An alternative model was drawn by Smith (2003) in opposition to the automatic process described by McDaniel and Einstein (2000). The Preparatory Attentional and Memory Processes Theory (PAM) suggests that preparatory mechanisms are necessary to realize Event-based prospective memory tasks. For Smith (2008), the consciousness in the performance of delayed intentions is crucial and explains why prospective remembering “is never automatic.” When the participant completes an ongoing task, the attention resources are limited and divided between the monitoring of the prospective cues in the environment and the execution of the ongoing task. Even if the prospective cue is focal or non-focal, two complementary strategic monitoring processes mobilize the cognitive resources (Guynn, 2003; 2008): The retrieval mode and the target-checking mechanism. The first is a monitoring action that maintains the intention in mind. The second one is responsible for assessing the presence or not of the prospective

cues in the environment (Bisiacchi et al., 2011). To summarize, the preparatory processes are activated in the interval between the plan formulation and the execution of the intended action. When the attentional processes have targeted the prospective cue, the action plan is reactivated in the conscience and the preparatory memory processes permit the retrieval of the information in order to execute the good action at the correct time.

Assessing prospective memory

Traditional neuropsychological tests are considered highly effective in isolating and delimiting a number of memory, attention, executive and other cognitive disorders. It is very important to understand how a person can function from a cognitive point of view (Lewis, Babbage, & Leathem, 2011). Specifically, these assessments are designed to isolate the functions in their ‘purest’ form by means of standardized tests administered in laboratory conditions; their psychometric robustness is thus well established. Although these assessments are considered fairly valid and reliable measures, the literature shows that when seen through the lens of ‘ecological measure,’ the association between participants’ test results and their actual functioning in day-to-day life is relatively weak (Manchester, Priestley, & Jackson, 2004). In fact, these tests paint at best a less than perfect picture concerning the interaction between cognitive functions and daily living activities (Parsons, Rizzo, & Buckwalter, 2004).

The ecological validity of measures of cognitive function is contingent on the functional and predictive relationship between an individual's performance on a set of neuropsychological tests and their real-life behaviour at home, at work, at school or in the community (Sbordone, 1996). In other words, a test is ecologically valid if it is able to predict an individual's level of function or detect potential problems in his/her daily life. The major challenge concerning a new paradigm in neuropsychological assessment is to develop tools with a good face-and-content validity (i.e. tasks should more closely resemble those in daily life) and with predictive validity (i.e. test must be correlated with the individual's real-life functioning.)

From a psychometric perspective, ecological validity is represented by the link between the results observed in a test and the capacities of the subject as it is seen in everyday life (Franzen & Wilhelm, 1996). Chaytor et al. (2003) have reported two dimensions of ecological tests; that is useful in the understanding of a cognitive assessment from an ecological perspective. To sum up, the test can be constructed or reviewed from a “veridicality” or “verisimilitude” perspective.

Veridicality concerns all existing traditional tests and the way which they are linked empirically with everyday life (Franzen & Wilhelm, 1996). Originally, the test had not been created to simulate daily-living activity. On the other hand, it can be predictive on how cognitive functions will help or not in the realization of an activity. The Trail Making Test (TMT), an attention and executive functions test, is a good example of this

kind of assessment. The theoretical construct of the TMT is not ecological, but it can be useful in terms of prediction. Here, it is important to remember that a test having good diagnosis capacities is not necessary ecologically valid. Moreover, Chaytor et al. (2006) have found some contradictions concerning correlations obtained between some traditional tests (e.g. WCST, Trail Making Test, Controlled Oral Word Association Test) and everyday performance in naturalistic tasks that imply executive functions. In brief, veridicality is a field of ecological assessment which claims that it is possible to use a traditional neuropsychological test in order to predict everyday performance; in the end, further research in this field as far as current literature is concerned must be conducted.

Verisimilitude represents the capacities of a test to have the same cognitive demands as those found in everyday life from a theoretical perspective (Franzen & Wilhelm, 1996). Wilson et al. (1998) have said this approach required reinventing neuropsychological assessment in order to create a new assessment protocol, nearer to the reality of the person. In this way, the expectation was to have a test with better content and criterion validity compared to a traditional one. Efforts such as those mentioned above, which set out to create everyday-like tests, make better the distinction between verisimilitude and veridicality of the neuropsychological assessment.

A very good verisimilar neuropsychological test is the Multiple Errands Test, which was initially developed by Shallice and Burgess, (1991). In this task, participants are asked to carry out tasks in a real environment. For example, the subject has to purchase

some items and spend less money as possible, to avoid buying non-asked items, to respect some arbitrary rules (e.g. "Don't talk to the evaluator during the task;" "Don't exit a definite perimeter," etc.). Although the MET has been shown to detect subtle problems of day-to-day living, it lacks reliability from a psychometric point of view (Cuberos-Urbano, Caracuel, Vilar-Lopez, Valls-Serrano, Bateman, & Verdejo-Garcia, 2013). Because the test is naturalistic, results obtained from the test in real-life settings are difficult to reproduce from individual to individual and from situation to situation (Dawson, Anderson, Burgess, Cooper, Krpan, & Stuss, 2009). But some authors have argued these psychometric considerations are contoured by a good inter-rater reliability (Dawson et al., 2009; Knight, Alderman, & Burgess, 2002). The main advantages of the MET are its sensitivity to specific neuropsychological deficits and its ecological validity (Curberos-Urbano et al., 2013).

From a neuropsychological perspective, the main challenge to developing new assessment tools is the standardization of assessment procedures that contain naturalistic and plausible tasks regarding day-to-day life. Morris, Kotisa, Bramham, Brooks, and Rose (2002) have argued that the development of ecological neuropsychological tests leads to the review of test structure. However, if the task implies real activity and interactivity with daily-living activities, then it could lack reliability in the way of repetition of measure. This is why some authors have tried to create new assessments performed in the office of the neuropsychologist with an ecological construct. This is the case for the Rivermead Behavioral Memory Test (RBMT) which was designed by

Wilson, Cockburn, and Baddeley (1985). The RBMT is a general memory assessment protocol with an ecological value. It has been developed to screen mnesic problems in everyday life. It contains twelve items similar to what the client could be confronted with in life. Specifically, the RBMT contains three prospective memory activities: 1) remembering a personal hidden object; 2) remembering to make an appointment 20 minutes later when a clock is ringing; 3) remembering to put an envelope down when the client has realized a short route.

For Burgess, Gonen-Yaacovi, and Volle (2011), several situations in the everyday life demand good prospective memory capacities. Actually, it seems to be difficult to have ecological and “verisimilar” measures of prospective memory. In order to reproduce day-to-day living in a more realistic way and to assure standardized, reliable, and valid measures, several researchers have explored the potential of virtual-reality (VR) technology. In virtual-reality environments, the user navigates in a computer-simulated environment and interacts with objects in real time, ‘like in real life’ (Pratt, Zyda, & Kelleher, 1995). This technology offers researchers the best of both worlds (Morris et al., 2002): it allows them to observe real-life situations in a laboratory setting (Wilson, Foreman, & Stanton, 1997). There are a number of advantages that make it attractive to those in the field of neuropsychological assessment. Firstly, it allows access to the construct of prospective memory in a systematic, rigorous, and standardized manner (Schutheis & Rizzo, 2001; Tarr & Warren, 2002; Zang, Abreu, Masel, Scheibel, Christiansen, Huddleston, & Ottenbacher, 2001) while at the same time providing a

degree of ecological realism (Zalla, Plassiart, Pillon, Grafman, & Sirigu, 2001). Also, because the effects of extraneous variables commonly encountered in real life can be controlled, virtual reality researchers can assess the effects of standardized ‘unexpected situations’ in these environments (Schutheis & Rizzo, 2001).

Eleven virtual environments have been developed to assess prospective memory and related cognitive functions; these environments have been tested on a variety of participant groups. The tasks used in previous studies fall into two main categories: (1) prospective memory tasks (conducted in a virtual apartment) related to moving into a new apartment, and (2) executive function tasks (based on a shopping task) that specifically assess either action planning or prospective memory via a multitasking paradigm. All tests based on action planning were carried out in a virtual shopping mall except for ‘virtual action planning’ (Zalla et al., 2001), which is set in an apartment, and the Virtual Errands Test (McGeorge, Phillips, Crowford, Garden, Della Sala, & Milne, 2001), in a virtual university.

All virtual environments except one (Lee et al., 2003) have a demonstrated ability to help in identifying the participants’ specific problems. In reviewing these environments, we have observed that all studies suffer from at least one ‘methodological flaw’ that diminishes both the psychometric quality and the ecological validity of the measure (from a verisimilitude point of view). Such flaws include: too few participants (Klinger, Chemin, Lebreton, & Marié, 2006; Lee et al., 2003; Rand, Katz, Shahar, Kizony, &

Weiss, 2005; Rand, Weiss, & Katz, 2009a; Raspelli et al., 2009; Zalla et al., 2001); too much disparity in the health conditions of the participants and difficulty getting enough participants with lesions in the same areas of the brain (Lee et al., 2003; Morris et al., 2002; Rand, Ruskan, Weiss, & Katz, 2009b; Rand, Katz, & Weiss, 2007; Raspelli et al., 2009; Zalla et al., 2001); the nature of the task not being completely naturalistic (Castelnuovo, LoPriore, Liccione, & Cioffi, 2003; Law, Logie, & Pearson, 2006; LoPriore, Castelnuovo, Liccione, & Liccione, 2003); no ongoing task (Knight, Harnett, & Titov, 2005); and finally, lack of data on the reliability of the measure (Attree, Dancey, & Pope, 2009; Brooks, Rose, Potter, Jayawardena, & Morling, 2004; Castelnuovo et al., 2003; LoPriore et al., 2003; Morris et al., 2002; Rand et al., 2005; Rand et al., 2007; Sweeney, Kersel, Morris, Manly & Evans, 2010; Zalla et al., 2001).

Objectives

The main objective of this study was to elaborate and validate a new assessment protocol of prospective memory using an immersive virtual reality technology. Specifically, we wanted to know if this immersive assessment could be a valid and reliable tool for assessing prospective memory. To achieve this goal, it is expected that participants' performance of three prospective tasks carried out in virtual reality will be correlated with their performance in two *functional 'paper and pencil' tasks*, analogous to the RBMT, *performed in an office*. Finally, we wanted to explore the internal consistency of the virtual protocol by analysing the Cronbach Alpha Coefficient.

Material and Methods

Participants. A total of 94 young, healthy participants were recruited from two rehabilitation centres, one college and two universities in the province of Québec, Canada. Ethics certificates were obtained from each of the institutions prior to recruitment.

Following the preliminary analyses, data from two participants were eliminated because they were unable to complete the experiment due to cybersickness ($n = 2$). Ninety-two participants (46 women and 46 men) between the ages of 17 and 57 years (mean age = 26.21 years, standard deviation = 8.57 years) were retained for statistical analysis. The mean level of education was 14.81 years (standard deviation = 2.99 years). There was no significant difference between women and men with respect to education [$F(1, 95) = 3.24, ns$] or age [$F(1, 95) = 0.51, ns$]. Finally, for the virtual reality assessment, no difference existed between the genders concerning the duration of the exploration of virtual environment ($F(1, 90) = 0.70; ns$); the mean time for the exploration was 9.60 minutes, with a standard deviation of 4.12.

Functional ‘paper and pencil’ tasks. The prospective memory ‘functional’ tasks used in this study were based on the approach adopted in the Rivermead Behavioural Memory Test (Wilson, Cockburn, & Baddeley, 1985). This procedure was similar to the one adopted by Kinsella, Murtagh, Landry, Homfray, Hammond, O’Beirne, Dwyer,

Lamont and Ponsford (1996). For the first task, *business card* (item name: CARD), the participant was told about the purpose of asking for the card and instructed to request it at the middle of the assessment session; the cue to realizing the intention was given by the experimenter who would say, “Now, we are coming at midpoint of the assessment session”. If the subject failed to request the business card, the experimenter would prompt him or her. In the second task, *personal belonging* (item name: BELONGING), the participant was asked to lend the experimenter a personal belonging (e.g. a watch, a pen, etc.), which the experimenter hid. At the end of the experiment, the participant had to remember to collect the item. The scoring system was inspired by the RBMT profile score: For remembering the action without a prompt, the participant received 2 points; for remembering the action with a prompt, 1 point; and finally, the participant had 0 points if he/she failed to remember the action with a prompt. The functional ‘paper and pencil’ tasks were scored out of 4: CARD (maximum 2) + BELONGING (maximum 2). The experimenter would make sure the participant remembered all intentions before beginning the experiment. The ongoing task was considered to be the other tasks performed by the participant (e.g. questionnaires, immersion, etc.) during the experiment.

Immersive Virtual Reality experimental protocol. The virtual environment contained two different apartments named for the research, “smaller apartment” and “larger apartment”. Figure 1 shows an overview of the rooms and their contents. At the beginning of the immersion, the participant was in a central corridor. He/she had the

choice concerning the first dwelling to visit. More specifically, the smaller apartment consisted of three main rooms: bathroom, bedroom and living room. Windows in both apartments permitted the participant to look outside. The larger apartment contained six rooms and was longer to visit: home office, living room, bedroom, bathroom, kitchen and dinner room. While different, these apartments contained similar focal (aquarium, lease, and fan) and non-focal (bedroom, kitchen, counter, switch, etc.) prospective cues. Before the test, the participant was informed that he/she wanted to move to another city for personal or professional reasons; thus, the participant had to find a new home. The ongoing task consisted in actively visiting these two apartments. To be sure that the ongoing task was really cognitively demanding, the participant was asked to verbally describe both apartments and to comment on them according to his/her personal tastes. The participant was voice-recorded throughout the task.

Insert Figure 1 about here

The prospective memory assessment in immersive virtual reality consisted of three different Event- and activity-based tasks. In the first, the participant had to acquire a lease, when going into the small apartment (item name: LEASE). Specifically, he/she was instructed that this document was important and contained all the renting conditions. The two apartments contained a lease but the one prepared by the owner for the subject was only in the small apartment. In order to ensure greater sensitivity in the virtual

reality assessment score, the participant had absolutely to pick up the lease in the smaller apartment.

In the second prospective memory task, realized in the larger apartment, where the clock showed 11:41 (the clock is static [i.e. the time shown never changed] and is found in the bedroom), the participant had to feed a fish in the home office (item name: FISH). In order to ensure greater sensitivity in the virtual reality assessment score, the participant had to absolutely say aloud “I am feeding the fish” while performing the action.

In the third prospective memory task, the participant had to turn off a fan on his/her way out of the bedroom (item name: FAN) in the larger apartment. The participant had to say aloud “I am turning off the fan” while performing the action.

Scoring for these three virtual reality tasks was based on four criteria. The participant had to (a) perform the correct task (1 point), (b) at the correct moment (1 point), (c) in the right place (1 point), and (d) to say aloud the performed action (1 point) for items FAN and FISH. For item LEASE, participant must be careful not to take the lease in the large apartment or in the small apartment by accident. The maximum total score in the virtual reality test was 12: FISH (maximum 4) + FAN (maximum 4) + LEASE (maximum 4). Before being immersed, the participant had to demonstrate his/her understanding of all prospective-memory tasks and that he/she grasped the

importance of verbalizing the actions (when performing prospective memory tasks) and verbalizing his/her comments for the ongoing task. The participant was given no time limit to visit the apartments and was allowed to perform the tasks in any order. The experimenter made sure the participant remembered all intentions (and the ongoing task) before beginning the immersion.

The virtual reality experiment was conducted using a laptop computer (Dell XPS M1530; operating system: Windows Vista) equipped with an nVidia 8600M GTO graphics card and an eMagin Z800 immersion lens with a resolution of 600 x 800 and an integrated head tracker. Movement in the virtual environment was controlled using a standard mouse. The virtual environments, created by Bouchard, Côté and Richard (2007), were a modified version of the video game *Max Payne™* in which the user could enter three different environments: a city and two apartments.

Procedure. Before the immersion, the experimenter briefed the participant on the two functional ‘paper and pencil’ prospective memory tasks. He then showed the participant the virtual-reality apparatus. He helped the participant adjust the head-mounted display and explained how to move around virtually using the mouse, what movements were possible, and how to interact with the virtual environment. When the apparatus was successfully set up, the participant visited the virtual city to gain familiarity with wearing the apparatus and being immersed in the environment.

The participant then received instructions for immersive assessment. In this procedure, the participant was required to move to a house located in the new city. In order to accomplish the task, he had to visit two apartments and choose the one he would prefer to live in. During the visit, he had to carry out the three prospective tasks and one ongoing task, which was to give his opinions on the practical and aesthetic aspects of the apartments based on his personal tastes and his needs as a new tenant. The experimenter stressed that it was very important for the participant to perform the ongoing task while visiting the apartments. The participant's comments and descriptions were given verbally and recorded using a digital recorder integrated into the computer.

Control measures. Two sets of questions were answered after the virtual reality experiment. The French translation (Bouchard, Robillard, & Renaud, 2007) of the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) (Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal, 1993) was used to quantify the intensity of cybersickness experienced during or after the immersion. The SSQ checks for a set of physical feelings or illnesses experienced by participants. The participants had to tell the experimenter at what point they felt the various sensations described in the SSQ. The questionnaire was included in the experimental procedure as a complementary measure since the symptoms brought on by the immersion might have acted as a barrier to studying prospective memory.

The French version (Viaud-Delmon, 2007) of the I-Presence Questionnaire (IPQ) (Schubert Friedmann, & Regenbrecht, 2001) consisted of three variables: a) spatial

presence (the feeling of being in the virtual environment), b) involvement (how much attention was paid to the virtual environment versus the real environment), and c) experienced realism (how real the virtual environment was judged to be). The IPQ was included in the experiment because it was thought that a weak sense of presence would affect the processes involved in monitoring the environment, thereby interfering with the participant's performance.

Results

Preliminary data analyses. Analyses of normality and homogeneity have revealed that none of the scores for prospective memory had a normal distribution both for virtual and functional procedures. Indeed, the data were mostly distributed to the right of the normal curve, indicating a high success rate for the tasks performed. In light of the heterogeneous distribution of these data and in order to achieve statistical analysis, we used a non-parametric approach.

Analysis of the control measures. The mean results for the different control measures showed that participants felt an “average” sense of presence ($M = 1.92 \pm 0.67$ on a scale of 0–4) and that very little or no cybersickness was experienced ($M = 0.47 \pm 0.40$ on a scale of 0–3). To sum up, the sense of presence was relatively correct; furthermore, the participants were not affected by the technology. In light of the above, we have concluded that it was best to continue the statistical analysis on both “virtual” and “functional” prospective memory tasks.

Analysis of results. Table 1 shows the descriptive statistics for healthy participants in functional and virtual prospective memory tasks by sex. The differences that exist between men and women are not significant for all dependant variables concerning prospective memory: fish [$F(1, 90) = 0,02; ns$]; lease [$F(1, 90) = 2,23; ns$]; fan [$F(1, 90) = 0,07; ns$]; card [$F(1, 90) = 0,06; ns$]; belonging [$F(1, 90) = 3,22; ns$]; total obtained in VR [$F(1, 90) = 0,72; ns$]; and total obtained for functional task [$F(1, 90) = 0,51; ns$].

Insert Table 1 about here

The Spearman correlation analyses had allowed us to look for the link between the results from the virtual-reality items (VR) and those from the functional items (Functional). In this criterion validity analysis, the correlation matrix (see Table 2) did not show a significant correlation between the VR total score and Functional total score [$r(92) = 0,18; ns$]. Furthermore, the correlation matrix did not reveal a significant correlation between functional-items and VR-items. Indeed, these results did not correspond with the research objectives. It is therefore possible to think that the VR protocol assessed different aspects compared with those evaluated by functional tasks.

Another analysis has demonstrated the existence of significant positive correlations between VR items, except for FISH and LEASE [$r(92) = 0,18; p=0,08$]. Each item taken from virtual reality is also positively and significantly correlated to the global score (i.e.

Total VR). All item-total correlations demonstrated a large effect size on the basis of Cohen's (1988) criteria.

Concerning the functional tasks, each item was significantly correlated together [i.e. CARD vs. BELONGING: $r(92) = 0,24$; $p<0,01$]. The overall score for the functional tasks was also significantly correlated with each of its items: CARD [$r(92) = 0,90$; $p<0,001$] and BELONGING [$r(92) = 0,62$; $p<0,001$]. Correlation coefficients, on the basis of Cohen's (1988) criteria, have demonstrated a large effect size for both variables.

Finally, item-to-item correlations for both VR and Functional tasks had a weak link together corresponding to a small effect size.

Insert Table 2 about here

In terms of divergent validity, the two types of tasks (virtual and functional) appear to measure different elements quite as each item seems to be different one from the other on the basis of the correlation weight. This interpretation is supported by two main elements: 1) absence of significant link and 2) small correlation coefficients (under 0.30). Moreover, the fact that no specific items were correlated together (i.e. items labelled functional vs. items labelled VR) tends to suggest that the measure was different. So, the first interpretation of these results extracted from the correlation matrix concerns the nature of the measure. From a psychometric point of view, we think that

the virtual reality protocol assesses different aspects of prospective memory when we compare it with those resulting of functional tasks.

The next step for the statistical analysis was to explore the reliability of virtual reality protocol. For this, we have realized an internal validity analysis with a Cronbach coefficient. The reliability coefficient was 0.42. This coefficient indicated that the scale (a combination of the three items) coming from the VR-protocol lacked precision and is not to be recommended for classifying the individual. In fact, it perhaps fails to be consistent and constant in the measurement. When looking at Table 3, all items appear to be important, but the item FISH could be retired without any real impact on the alpha coefficient.

Insert Table 3 about here

From an exploratory perspective, we have analysed the scale formed by the two items (CARD & BELONGING) from the functional task. The Cronbach coefficient was 0.38. The interpretation of this data has led us to consider the scale for these tasks as an unreliable tool (i.e. unable to classify individuals about prospective memory capacities). Perhaps this could be attributed to the fact that two items are too few to assess the entire construct concerning prospective memory.

For Laurencelle (1998), a test that contains a high number of items is more reliable than a tool based on a lower number of items. In this way, the virtual reality protocol is confronted with two different problems: firstly, it does not contain enough elements to have a strong validity coefficient; and secondly, its items seem to differ one from the other. While combining VR-protocol to Functional protocol would seem to be a good idea, the problem of the heterogeneity of items would unfortunately remain.

Discussion

The main objective of the present research was to demonstrate that our immersive virtual reality protocol could be a valid and reliable assessment tool for prospective memory. This was done by recruiting 92 participants from the general population and immersing them in a virtual environment consisting of two distinct apartments. The participants were then given three tasks to complete following the virtual reality protocol. They were also asked to realize two tasks, at different times, in a functional 'paper and pencil' setting similar to those used in the RBMT. Their performances in the two settings have been put together, correspondingly to a criterion validity approach.

For Richard and Blais (2004), validity is a judgment based on empirical proofs and on theoretical argumentation with the goal of justifying the interpretation of the scores obtained after administering the test. Concerning this theoretical dimension, it is possible to say these prospective memory tasks, both in their virtual and functional forms, did not

have a good face validity. This could be explained by the fact that the ongoing task was not demanding enough to solicit completely the attentional resources. As a result, the tasks were too easy.

Concerning the research for empirical proofs about the validity of the Virtual-Reality tool, the statistical analysis, based on a criterion validity procedure, did not indicate any relationship between immersive and functional testing procedures. In fact, the results showed a weak non-significant correlation between the total score of the two assessment approaches (VR and Functional). Because the results obtained are not statistically significant, they do not provide a clear indication of what it is really being scored. That said, at least one hypothesis could be formulated: the two tasks could belong to a different theoretical construct and solicit different groups of cognitive functions such as planning, organisation, focussed attention, etc. Finally, in the following section we will try to put forward some reasons as to why the research objectives were not reached.

Choice criteria and the nature of the tasks. From a theoretical point of view, it is plausible that the two scales (virtual and functional) cover different aspects of cognition. This interpretation is confirmed partially by the fact that the correlation coefficient is very weak between the two total scores. In neuropsychology, this phenomenon is not common because cognitive functions are by and large in partial interaction. This explanation leads us to the conclusion that the present study raises several

methodological problems, the most significant being linked to the conceptual differences existing between the Virtual-Reality protocol and Functional tasks. At this point, it could be suggested that the Functional tasks are less demanding for the target monitoring processes when compared with the Virtual-Reality protocol. During the Virtual-Reality protocol, attention was divided among several tasks (visiting the apartments with a definite goal, evaluating and commenting on the apartments with regard to personal taste and needs, seeking prospective cues in a new situation so as to be able to initiate voluntary remembering at the correct time, manipulating the equipment, etc.) It appears possible that a participant's exploration and monitoring of the virtual environment (which is more active than Functional tasks) is affected by the distraction caused by the ongoing task. In order to validate this idea, an *a posteriori* test was practised. Firstly, the score for Virtual Reality and for Functional setting was transformed in a linear T scale (so as to facilitate the comparison of score). Secondly, a t-test of mean comparison was performed. Surprisingly, the result suggests that the Functional setting was more difficult (mean T score = 41,49) than VR protocol (mean T score = 50,01) [t (92)=6,38; $p<0,001$]. The outcome of these results is not as expected, but it tends to confirm the hypothesis that the two measures are different.

Graf and Utzl (2001) and Utzl (2008) have identified different subdomains of prospective memory: a) prospective memory proper or episodic prospective memory, b) vigilance/monitoring, c) habitual memory. A meta-analysis led by Utzl (2008) has demonstrated a difference in the performance of the individual in laboratory conditions

compared to a natural setting, people being better in the second context. These findings support the idea discussed here, where cognitive processes are solicited differently according to the type of assessment. It is possible, such as mentioned by Maylor (1996), that there exist some other non-cognitive variables explaining difference of performance in these two settings.

As mentioned in the methodological section, functional items were inspired by the RBMT and this procedure was analogous to those used by Kinsella et al. (1996). Studies realized with RBMT have shown good validity for a general memory assessment (Wilson, Clare, Baddeley, Cockburn, Watson, & Tate, 1999; Wilson, Cockburn, & Baddeley, 1985; Wilson, Cockburn, Baddeley, & Hiorns, 1989) . Moreover, the inter-judges reliability is high and reveals a stable evaluation scale. However, it is impossible to have a good idea about the construct validity concerning only prospective memory items. As Wilson et al. (1989) said, "*It appears then that the RBMT can broadly speaking be regarded as measuring overall memory performance... p.863*". Thus, using only specific items appears to be an important methodological weakness (Wilson et al., 1989).

Number of items in the tasks. The internal consistency analysis has shown that both tasks (VR and Functional) did not have enough items to be reliable. In fact, the Alpha coefficient (Cronbach) for internal consistency shows that the VR scale and Functional scales are classed as "non-useful". These reliability's results are not

surprising. Precisely, to have used only two or three items can be perceived as another methodological bias to this reliability procedure. This influences negatively the justness and general applicability of the results. That could also explain why weak correlations between the two tools were observed and why the reliability coefficient was unusable.

Nature of the ongoing task. Detailed considerations of the assessment procedures used in this study lead us to believe that the ongoing task, during which the participant has to comment on and describe his/her visit to the apartments, could be a variable useful in distinguishing VR protocol from Functional tasks. This distinction can provide another explanation for the weak correlations between immersive protocol and Functional tasks. It seems that the ongoing tasks from the two protocols were not equivalent. Utzl (2011) has mentioned the importance of taking into account the ongoing task difficulty in the elaboration of prospective memory tasks. These indications are consistent with McDaniel's and Einstein's Multiprocess theory and Smith's (2003) PAM theory. Seen from this view, the participant's need to redirect attention that is normally devoted to the ongoing task toward prospective memory task indicates difficulty in prospective memory tests (Maylor, 1996). With regard to the Virtual Reality items, the ongoing task may have less impact on attention processes because it doesn't interfere with the vigilance/monitoring processes. This, in turn leaves the plan within the consciousness between successive presentations of prospective memory cues (Utzl, 2011).

Studies have shown that participants perform less well significantly when asked to perform mobilizing secondary tasks than those who are able to devote all their attention to one task (Einstein, Smith, McDaniel, & Shaw, 1997; Marsh & Hicks, 1998; McDaniel et al., 1998). The data is consistent with our results, which suggests that the ongoing task does not place the participant in a situation of multitasking, which is difficult enough and which does not cause a cognitive overload. Future research should include a procedure in order to weigh the impact of the ongoing task in the mobilization of cognitive capacities.

Richard and Blais (2004) have mentioned that validity process is sustained by the accumulation of evidence concerning the interpretation of the score obtained. The main advantage of this research, even if the goal was not reached, is to analyze the weakness of and the potential for using a virtual reality protocol in order to assess prospective memory. The first dimension observed is the complexity of the phenomenon and the need for a multidimensional assessment tool. The construction of items and the scale of measurement ought to be revised in order to permit a better interpretation of the measure. Secondly, the ongoing task seems to play an important role in avoiding the ceiling effect by creating a cognitive overload. The ongoing task, for example, gives us the ability to modify the requirements of the assessment by adding to cognitive demands, thus requiring skills in managing overload. Because the participant tends to be better in an everyday-like task, the strategies used to perform should be analysed and

compared with those used in a laboratory setting or in a traditional neuropsychological assessment.

Quotation system. Another source of bias could be the quotation system coming from the two procedures (i.e. Virtual Reality (0-3) and Functional setting (0-2). This quotation system seems to lack precision and could lead to some difficulties in the classification of the individual's performance. In addition, it is possible to believe that the lack of variability in the scale could provoke a ceiling effect for a healthy population.

Strengths and weaknesses. The main strength of this research was to have created an immersive protocol that seems verisimilar (or nearer to everyday cognitive requirement). A second strength of this study was that it shows how complex the construct of prospective memory and multitasking is; that was well represented by all the analysis leading in this paper. The study also highlights the need to use assessment protocol by using several tests that complement each other. In this way, it seems to be easier to look for the contribution of different processes involved in carrying out future intentions. In examining the complex construct of prospective memory, clinicians should not only strive to reproduce real-life demands in their testing procedures, but also consider a wide range of assessment tools measuring cognitive functions implied in prospective memory processes (Sbordone, 1996).

With respect to the weaknesses, the tasks in this study may simply have been too easy, which would have altered the distribution and the normality of the data. Still, as previous studies have indicated, it is also possible that healthy participants perform well in prospective-memory tests because they have fewer difficulties using this cognitive function in their everyday life; in this case, our results would have shown a ceiling effect (Knight & Titov, 2009; Law, Logie, & Pearson, 2006; Utzl, 2011). For this reason, it may prove relevant to conduct subsequent studies on ‘clinical’ groups where the expectation is a greater variability in the performance as a result of brain lesions. It would then be important to verify if the virtual procedure that we have developed is truly useful in distinguishing between the performance of clinical populations and that of the general population. This kind of study could go in the same way as those aimed at determining whether prospective memory performance could be a diagnostic criterion (Blanco-Campal, Coen, Lawlor, Walsh, & Burke, 2009) of some neurological dysfunction.

Conclusion

Two patterns emerge from this research. Firstly, it is not clear, with the results presented here, that virtual reality has the potential of being a useful tool in assessing prospective memory in a naturalistic manner. Secondly, virtual reality research and the recent development of tasks – tasks that are truly “ecological in nature” – seem part of a new current in the field of neuropsychological assessment, one that would complement

traditional testing and improve the diagnostic and prognostic value of clinical results. Developments in this area would challenge researchers and clinicians to re-imagine neuropsychological testing and demonstrate the usefulness of virtual reality technology.

Acknowledgements

We would like to thank the Centres de réadaptation en déficiences physiques of Le Bouclier and La Maison, who helped fund this research and allowed us to contact their employees.

This research was partly funded by the Fonds de développement académique du réseau (FODAR) of the Universities of Québec.

Disclosure statement

No competing financial interests exist.

References

- Attree, E. A., Dancey, C. P., & Pope, A. L. (2009). An assessment of prospective memory retrieval in women with chronic fatigue syndrome using a virtual-reality environment: An initial study. *Cyberpsychology & Behavior*, 12(4), 379-385.

- Bisiacchi, P. S., Cona, G., Schiff, S., & Basso, D. (2011). Modulation of a Fronto-Parietal Network in Event-Based Prospective Memory: An rTMS Study. *Neuropsychologia*, 49(8), 2225-2232.
- Blanco-Campal, A., Coen, R. F., Lawlor, B. A., Walsh, J. B., & Burke, T. E. (2009). Detection of prospective memory deficits in mild cognitive impairment of suspected Alzheimer's disease etiology using a novel event-based prospective memory task. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 15(1), 154-159.
- Bouchard, S., Côté, S., & Richard, D. (2007). Virtual reality applications for exposure. In D. Richard, & D. Lauterbach (Eds.), *Handbook of exposure therapies* (pp. 347-388). Florida, FL: Academic Press.
- Brooks, B.M., Rose, F.D., Potter, J., Jayawardena, S., & Morling, A. (2004). Assessing stroke patients' prospective memory using virtual reality. *Brain Injury*, 18(4), 391-401.
- Burgess, P. W., & Shallice, T. (1997). The relationship between prospective and retrospective memory: Neuropsychological evidence. In M. A. Conway (Ed.), *Cognitive models of memory*. (pp. 247-272). Cambridge, MA: The MIT Press.
- Burgess, P. W., Gonen-Yaacovi, G., & Volle, E. (2011). Functional neuroimaging studies of prospective memory: What have we learnt so far? *Neuropsychologia*, 49(8), 2246-2257.

- Burgess, P. W., Scott, S. K., & Frith, C. D. (2003). The role of the rostral frontal cortex (area 10) in prospective memory: A lateral versus medial dissociation. *Neuropsychologia*, 41(8), 906-918.
- Castelnuovo, G., LoPriore, C., Liccione, D., & Cioffi, G. (2003). Virtual Reality based tools for the rehabilitation of cognitive and executive functions: The V-STORE. *PsychNology Journal*, 1(3), 310-325.
- Chevignard, M. P., Soo, C., Galvin, J., Catroppa, C., & Eren, S. (2012). Ecological assessment of cognitive functions in children with acquired brain injury: A systematic review. *Brain Injury*, 26(9), 1033-1057.
- Einstein, G. O., Smith, R. E., McDaniel, M. A., & Shaw, P. (1997). Aging and prospective memory: The influence of increased task demands at encoding and retrieval. *Psychology and Aging*, 12, 479-488.
- Ellis, J. (1996). Prospective memory or the realisation of delayed intentions: A conceptual framework for research. In M. Brandimonte, G.O. Einstein, & M. A., McDaniels (Eds.), *Prospective memory: Theory and applications* (pp. 1-22). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Graf, P., & Grondin, S. (2006). Time perception and time-based prospective memory. In J. Glicksohn, & M. S. Myslobodsky (Eds.), *Timing the future: The case for a time-based prospective memory*. (pp. 1-24). River Edge, NJ: World Scientific Publishing Co.
- Graf, P., & Uttl, B. (2001). Prospective memory: A new focus for research. *Consciousness and Cognition: An International Journal*, 10(4), 437-450.

- Groot, Y. C. T., Wilson, B. A., Evans, J., & Watson, P. (2002). Prospective memory functioning in people with and without brain injury. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 8(5), 645-654.
- Guynn, M. J. (2003). A two-process model of strategic monitoring in event-based prospective memory: Activation/retrieval mode and checking. *International Journal of Psychology*, 38(4), 245.
- Guynn, M. J. (2008). Theory of monitoring in prospective memory: Instantiating a retrieval mode and periodic target checking. In M. Kliegel, M. A. McDaniel, & G. O. Einstein (Eds.), *Prospective memory: Cognitive, neuroscience, developmental, and applied perspectives*. (pp. 53-76). New York, NY: Taylor & Francis Group/Lawrence Erlbaum Associates.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3, 203-220.
- Kinsella, G., Murtagh, D., Landry, A., Homfray, K., Hammond, M., O'Beirne, L., Dwyer, L., Lamont, M., & Ponsford, J. (1996). Everyday memory following traumatic brain injury. *Brain Injury*, 10, 499–507.
- Kliegel, M., Mackinlay, R., & Jäger, T. (2008). Complex prospective memory: Development across the lifespan and the role of task interruption. *Developmental Psychology*, 44(2), 612-617.
- Klinger, E., Chemin, I., Lebreton, S., & Marié, R-M (2006). Virtual action planning in Parkinson's disease: A control study. *Cybertherapy & Behavior*, 9(3), 342-347.

- Knight, R. G., & Titov, N. (2009). Use of virtual reality tasks to assess prospective memory: Applicability and evidence. *Brain Impairment*, 10(1), 3-13.
- Knight, R. G., Harnett, M., & Titov, N. (2005). The effects of traumatic brain injury on the predicted and actual performance of a test of prospective remembering. *Brain Injury*, 19(1), 27-38.
- Knight, R. G., Titov, N., & Crawford, M. (2006). The effects of distraction on prospective remembering following traumatic brain injury assessed in a simulated naturalistic environment. *Journal of The International Neuropsychological Society*, 12(1), 8-16.
- Kvavilashvili, L., & Ellis, J. (1996). Varieties of intention: Some distinctions and classifications. In M. Brandimonte, G. O. Einstein, & M. A. McDaniel (Eds.), *Prospective memory: Theory and applications*. (pp. 23-51). Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Laurencelle, L. (1998). Théorie et technique de la mesure instrumentale. Québec : Presses de l'Université du Québec.
- Law, A. S., Logie, R. H., & Pearson, D. G. (2006). The impact of secondary tasks on multitasking in a virtual environment. *Acta Psychologica*, 122, 27-44.
- Lee, J. H., Ku, J., Cho, W., Hahn, W. Y., Kim, I. Y., Lee, S-M., Kang, Y., Kim, D. Y., Yu, T., Wiederhold, B., Wiederhold, M. D., & Kim, S. I. (2003). A Virtual Reality system for the assessment and rehabilitation of the activities of daily living. *CyberPsychology & Behavior*, 6(4), 383-388.

- Lewis, M. W., Babbage, D. R., & Leathem, J. M. (2011). Assessing executive performance during cognitive rehabilitation. *Neuropsychological Rehabilitation*, 21(2), 145-163.
- LoPriore, C., Castelnuovo, G., & Liccione, D. (2003). Experience with V-STORE: Considerations on presence in virtual environments for effective neuropsychological rehabilitation of executive functions. *Cyberpsychology and Behavior*, 6(3), 281-287.
- Manchester, D., Priestley, N., & Jackson, H. (2004). The assessment of executive functions: Coming out of the office. *Brain Injury*, 18(11), 1067-1081.
- Marsh, R. L., & Hicks, J. L., (1998). Event-based prospective memory and executive control of working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 34, 336-349.
- Mathias, J. L., & Mansfield, K. M. (2005). Prospective and declarative memory problems following moderate and severe traumatic brain injury. *Brain Injury*, 19(4), 271-282.
- Maylor, E. A., (1996). Age-related impairment in an event-based prospective memory task. *Psychology and Aging*, 11(1), 74-78.
- McDaniel, M. A., & Einstein, G. O. (2007). *Prospective memory: An overview and synthesis of an emerging field*. Los Angeles, LA: Sage Publications.
- McDaniel, M. A., & Einstein, O. G. (2000). Strategic and automatic processes in prospective memory retrieval: A multiprocess framework. *Applied Cognitive Psychology*, 14, S127-S144.

- McDaniel, M. A., Einstein, G. O., & Rendell, P. G., (2008). The puzzle of inconsistent age-related declines in prospective memory: A multiprocess explanation. In M. Kliegel, M. A., McDaniel, & G. O. Einstein (Eds.), *Prospective memory: Cognitive, neuroscience, developmental and applied perspectives* (pp 141-160). New York, NY: Lawrence Erlbaum Associates.
- McDaniel, M. A., Robinson-Riegler, B., & Einstein, G. O. (1998). Prospective remembering: Perceptually driven or conceptually driven? *Memory & Cognition*, 26, 121-134.
- McGeorge, P., Phillips, L. H., Crawford, J. R., Garden, S. E., Della Sala, S., & Milne, A. B. (2001). Using virtual environments in the assessment of executive dysfunction. *Presence*, 10, 375–383.
- Morris, R. G., Kotitsa, M., Bramham, J., Brooks, B., & Rose, F. D. (2002) Virtual reality investigation of strategy formation, rule breaking and prospective memory in patients with focal prefrontal neurosurgical lesions. *Prc. 4th Intl Conf. Disability, Virtual Reality and Assoc. Tech.* Hungary, 101-108.
- Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behaviour. In R. J. Davidson, G. E. Schwartz, & D. Shapiro, D. (Eds.). *Consciousness and self-regulation: Advances in research and theory*. New York, NY: Plenum Press.
- Parsons, T. D., Rizzo, A. A., & Buckwalter, J. G. (2004). Backpropagation and regression: Comparative utility for neuropsychologists. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 26(1), 95-104.

- Pavawalla, S. P., Schmitter-Edgecombe, M., & Smith, R. E. (2012). Prospective memory after moderate-to-severe traumatic brain injury: A multinomial modeling approach. *Neuropsychology*, 26(1), 91-101.
- Potvin, M., Rouleau, I., Audy, J., Charbonneau, S., & Giguère, J. (2011). Ecological prospective memory assessment in patients with traumatic brain injury. *Brain Injury*, 25(2), 192-205.
- Pratt, D. R., Zyda, M., Kelleher, K. (1995). Virtual reality: In the mind of the beholder. *IEEE Computer*, 28(7), 17-19.
- Rand, D., Basha-Abu Rukan, S., Weiss, P. L., & Katz, N. (2009b). Validation of the virtual MET as an assessment tool for executive functions. *Neuropsychological Rehabilitation*, 19, 583–602.
- Rand, D., Katz, N., & Weiss, P. L. (2007). Evaluation of virtual shopping in the VMall: Comparison of post-stroke participants to healthy control groups. *Disability and Rehabilitation*, 13, 1–10.
- Rand, D., Katz, N., Shahar, M., Kizony, R., & Weiss, P. L. (2005). The virtual mall: A functional virtual environment for stroke rehabilitation. *Annual Review of Cybertherapy and Telemedicine: A decade of VR*, 3, 193–198.
- Rand, D., Weiss, P. L., & Katz, N. (2009a). Training multitasking in a virtual supermarket: A novel intervention following stroke. *American Journal of Occupational Therapy*, 63, 535-542.

- Raspelli, S., Carelli, L., Morganti, F., Albani, G., Pignatti, R., Mauro, A., Poletti, B., Corra, B., Silani, V., & Riva, G. (2009). A Neuro VR-Based version of the multiple errands test for the assessment of executive functions: a possible approach. *Journal of Cybertherapy and Rehabilitation*, 2(4), 299-313.
- Sbordone, R. J. (1996). Ecological validity: Some critical issues for neuropsychologist. In R. J. Sbordone, & C. J. Long (Eds.), *Ecological validity of neuropsychological testing* (pp. 15-42). New York, NY: St-Lucie Press.
- Schubert, T., Friedman, F., & Regenbrecht, H. (1999). Decomposing the sense of presence: Factor analytic insights. *Extended Abstract to the 2nd International Workshop on Presence*, 1-5.
- Schutheis, M. T., & Rizzo A. A. (2001). The application of virtual reality technology in rehabilitation. *Rehabilitation Psychology*, 46, 296-311.
- Shallice, T., & Burgess, P. W. (1991). Deficits in strategy application following frontal lobe damage in man. *Brain*, 114, 727-741.
- Shum, D., Fleming, J. M., & Neulinger, K. (2002). Prospective memory and traumatic brain injury: A review. *Brain Impairment*, 3(1), 1-16.
- Smith, R. E. (2003). The cost of remembering to remember in event-based prospective memory: Investigating the capacity demands of delayed intention performance. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 30, 756-777.

- Smith, R. E. (2008). Connecting the past and the future: Attention, memory and delayed intentions. In M. Kliegel, M. A., McDaniel, & G. O. Einstein (Eds.), *Prospective memory: Cognitive, neuroscience, developmental and applied perspectives* (pp 29-52). New York, NY: Lawrence Erlbaum Associates.
- Stuss, D. T., & Benson, D. F. (1986). *The frontal lobes*. New York, NY: Raven.
- Sweeney, S., Kersel, D., Morris, R. G., Manly, T., & Evans, J. J. (2010). The sensitivity of a virtual reality task to planning and prospective memory impairments: Group differences and the efficacy of periodic alerts on performance. *Neuropsychological Rehabilitation*, 20(2), 239-263.
- Tarr, M. J., & Warren, W. H. (2002). Virtual reality in behavioral neurosciences and beyond. *Nature Neuroscience*, 5, 1089-1092.
- Uttl, B. (2008). Transparent meta-analysis of prospective memory and aging. *Plos One*, 3(2), e1568-e1568.
- Uttl, B. (2011). Transparent meta-analysis: Does aging spare prospective memory with focal vs. non-focal cues? *Plos One*, 6(2), e16618-e16618.
- Viaud-Delmon (2007). iGroup presence questionnaire (French translation). www.igroup.org/pq/ipq/download.php.
- Vriezen, E. R., & Pigott, S. E. (2002). The relationship between parental report on the BRIEF and performance-based measures of executive function in children with moderate to severe traumatic brain injury. *Child Neuropsychology*, 8(4), 296-303.

- Wilson, B. A., Baddeley, A. D., & Cockburn, J. M. (1989). How do old dogs learn new tricks: Teaching a technological skill to brain injured people. *Cortex*, 25(1), 115-119.
- Wilson, B. A., Cockburn, J., & Baddeley, A. (1985). *The Rivermead Behavioral Memory Test*. Titchfield, England: Thames Valley Test.
- Wilson, B. A., Evans, J. J., Emslie, H., Zangwill, O., Alderman, N., & Burgess, P. W. (1998). The development of an ecologically valid test for assessing patients with a dysexecutive syndrome. *Neuropsychological Rehabilitation*, 8(3), 213-228.
- Wilson, P. N., Foreman, N., & Stanton, D. (1997). Virtual reality, disability and rehabilitation. *Disability and Rehabilitation*, 19(6), 213-220.
- Zalla, T., Plassiart, C., Pillon, B., Grafman, J., & Sirigu, A. (2001). Action planning in a virtual context after prefrontal cortex damage. *Neuropsychologia*, 39, 759-770.
- Zhang, L., Abreu, B. C., Masel, B., Scheibel, R. S., Christiansen, C. H., Huddleston, N., & Ottenbacher, K. J. (2001). Virtual reality in the assessment of selective cognitive function after brain injury. *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 80(8), 597-604.

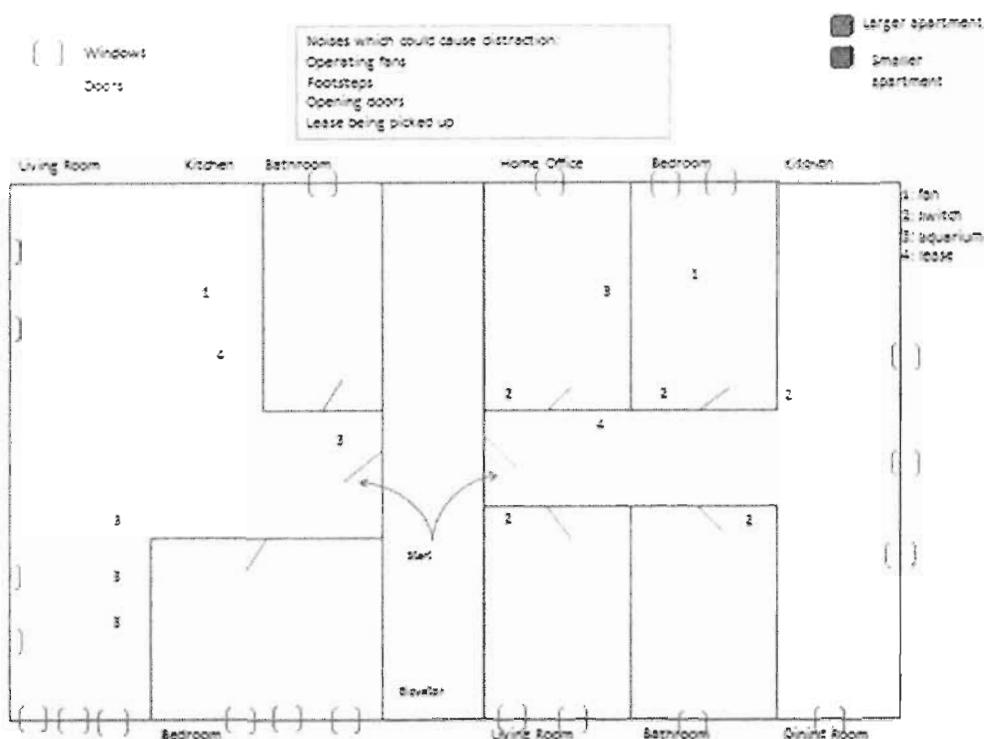


Figure 1. Virtual environment layouts used in the experiment.

Table 1.
Descriptive statistics for the sample divided by sex.

			N	Mean	SD	Stand. Error	Confidence interval at			
									95%	
Fish	Women		46	3,61	0,74	0,11	3,39	3,83	0	4
	Men		46	3,63	0,83	0,12	3,39	3,88	0	4
	Total		92	3,62	0,78	0,08	3,46	3,78	0	4
Fan	Women		46	3,24	1,16	0,17	2,90	3,58	0	4
	Men		46	3,17	1,22	0,18	2,81	3,54	0	4
	Total		92	3,21	1,18	0,12	2,96	3,45	0	4
Lease	Women		46	3,37	1,02	0,15	3,07	3,67	0	4
	Men		46	3,04	1,07	0,16	2,72	3,36	0	4
	Total		92	3,21	1,05	0,11	2,99	3,42	0	4
Total RV	Women		46	10,22	2,10	0,31	9,59	10,84	4	12
	Men		46	9,85	2,08	0,31	9,23	10,46	4	12
	Total		92	10,03	2,08	0,22	9,60	10,46	4	12
Card	Women		46	1,22	0,92	0,14	0,95	1,49	0	2
	Men		46	1,26	0,83	0,12	1,01	1,51	0	2
	Total		92	1,24	0,87	0,09	1,06	1,42	0	2
Belonging	Women		46	1,80	0,45	0,07	1,67	1,94	0	2
	Men		46	1,59	0,69	0,10	1,38	1,79	0	2
	Total		92	1,70	0,59	0,06	1,57	1,82	0	2
Total functional	Women		46	3,02	1,06	0,16	2,71	3,34	1	4
	Men		46	2,85	1,26	0,19	2,47	3,22	0	4
	Total		92	2,93	1,17	0,12	2,69	3,18	0	4

Table 2.
Correlation matrix for the prospective memory variables and total scores

	Fish	Fan	Lease	Card	Belonging	Total VR	Total Functional
Fish	1,000	0,28**	0,18	0,01	-0,03	0,56**	0,02
Fan		1,000	0,27*	0,11	0,14	0,74**	0,17
Lease			1,000	0,15	0,02	0,70**	0,12
Card				1,000	0,24*	0,14	0,90**
Belonging					1,000	0,09	0,62**
Total VR						1,000	0,18
Total Functional							1,000

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Table 3.
Statistical elements extracted from Reliability analysis

	Mean of the scale in case of deletion of an element	Variance of the scale in case of deletion of an element	Square of the multiple correlation	Alpha of Cronbach if item deleted
Fan	6,83	1,88	0,11	0,17
Lease	6,83	2,34	0,09	0,29
Fish	6,41	3,23	0,04	0,45

Chapitre II

Discriminant Validity of an Ecologically Oriented Virtual Reality Measure among

Authors:

Frédéric Banville, M. A.
University of Québec at Rimouski
University of Québec at Trois-Rivières

Pierre Nolin, Ph. D.
University of Quebec at Trois-Rivières

Source of work:

This study forms a part of the doctoral studies of the first author.

Title: Discriminant Validity of an Ecologically Oriented Virtual Reality Measure among Adults with Traumatic Brain Injury

Keywords:

Virtual Reality, Traumatic Brain Injury, Discriminant Validity, Ecological Measure

Correspondence:

Frédéric Banville,
Département des sciences infirmières
Université du Québec à Rimouski
300, allée des Ursulines, C.P. 3300, succ. A
Rimouski (Québec)
G5L 3A1
frederic_banville@uqar.ca

Acknowledgements

The authors acknowledge the contributions of Dr. Stéphane Bouchard of the University of Québec in Outaouais and the Canada Research Chair in Clinical Cyberpsychology, who made this research possible through his methodological and technical support.

We would also like to thank the Rehabilitation Physical Disabilities Centres Le Bouclier and La Maison, who helped fund this research and allowed us to contact their employees and clients.

This research was partly funded by the Fonds de développement académique du réseau (FODAR) of the Universities of Québec.

Abstract

Deficits in cognitive functions are common after traumatic brain injury (TBI), and such deficits can affect people's social participation. Neuropsychological assessment tools have thus far been met with limited success in identifying the subtle cognitive deficits that interfere with the performance of everyday functioning. *Objective:* To demonstrate the relevance of an assessment procedure that uses ecologically oriented immersive virtual reality to detect post-traumatic cognitive disorders. *Method:* Thirty-one participants who have sustained a traumatic brain injury (TBI) were compared with 31 control healthy participants. The two groups had to visit two virtual apartments and perform three prospective memory-like tasks. They also had to perform two involved "functional prospective memory-like tasks" realized in an office. *Results:* Participants with TBI were less efficient only at the virtual reality tasks. The results from the assessments conducted in this study, the first using immersive virtual reality protocol and the second functional tasks, enabled us to classify participants by group (i.e. TBI or control) with a 74.2% success rate. *Conclusion:* The present study shows the relevance of virtual reality as a complement to traditional assessment tasks in assessing cognitive dysfunctions after a traumatic brain injury.

Introduction

Each year, approximately 1.9 million people are taken to the hospital for traumatic brain injury (TBI) in the United States (Kraus & Sorenson, 1994). Of these, 235,000 receive emergency medical care, and nearly 1.1 million of them receive rehabilitation after their TBI (Trudel, Scherer, & Elias, 2009). Following rehabilitation, an estimated 100,000 persons must learn to cope with serious cognitive deficits or permanent physical or psychosocial disabilities (Trudel et al. 2009).

Menon et al. (2010) define TBI as “an alteration in brain function, or other evidence of brain pathology, caused by an external force.” Due to the high rate of post-injury neurological lesions, almost all individuals with moderate or severe TBI experience permanent cognitive effects (Fay, Yeates, Wade, Drotar, Stancin, & Taylor, 2009; Pinkston, Santa Maria, & Davis, 2000). TBI greatly influences people’s adaptive behaviours in day-to-day life (Sosin, Sacks, & Webb, 1996). Prospective memory problems are the most frequent complaints among those with TBI (Cockburn, 1995; Groot, Wilson, Evans, & Watson, 2002; Knight, Harnett, & Titov, 2005; McDaniel, Glisky, Rubin, Guynn, & Routhieaux, 1999; Shum, Valentine, & Cutmore, 1999), and these tend to persist long after the individual has recovered from the acute effects of TBI (Anderson & Knight, 2010).

Ecological assessment is a key element in detecting post-traumatic problems. Among a set of functions influencing people's performance in everyday activities are executive functions and prospective memory. Indeed, remembering to carry out intentions (or prospective memory) is a fundamental activity. Any deficit in this area is liable to carry important consequences for the affected individual, especially with respect to their independence (Cockburn, 1995; Knight, Titov, & Crawford, 2006; McDaniel et al., 1999; Shum, Fleming, & Neulinger, 2002) and their socialization (Fleming, Riley, Gill, Gullo, Strong, & Shum, 2008; Mangeot, Armstrong, Colvin, Yeates, & Taylor, 2002).

Research on prospective memory in individuals with TBI is a major field of study. However, most of this research has taken place in laboratory-type environment settings in which tasks seem often artificial compared with those encountered in daily life. An ecological approach to prospective memory research, by contrast, would employ tasks that are more realistic with respect to everyday life and consequently yield greater sensitivity in detecting post-traumatic cognitive impairment (Burgess, Gonen-Yaacovi, & Volle, 2011). Essentially, this is a verisimilitude ecological approach. Verisimilitude refers to the capacities of a test to have, from a theoretical perspective, the same cognitive exigencies as in everyday life (Franzen & Wilhelm, 1996). Wilson, Evans, Emslie, Zangwill, Alderman, and Burgess (1998) have said this approach reinvented neuropsychological assessment in order to create new assessment protocol that is closer

to the reality of the person. The aim is to have a test with better face validity compared to a traditional assessment.

At first glance, prospective memory seems a relatively simple concept: performing a concrete action at a specific time. However, the processes involved—from the planning of an action to its execution—are theoretically quite complex. Prospective memory involves a set of behaviours directed towards a goal (i.e. performing the action), and these behaviours in turn necessarily involve the executive functions (Stuss & Benson, 1986). These are essentially a set of high-level processes that control and regulate not only cognitive functions but also emotions and behaviours (Stuss & Benson, 1986, Vriezen & Pigott, 2002). The processes involved in prospective remembering can be divided into four phases (Kliegel, Mackinlay & Jäger, 2008): (a) formulating the intention, (b) retaining the intention during ongoing tasks, (c) self-initiating the intention at the end of the delay period, and (d) performing the action at the appropriate time. The first step draws on the individual's action-planning skills. The second step requires the ability to store the information during the intention retention phase. The third phase underlines the importance of monitoring prospective target and managing interferences, inhibiting them as necessary. The fourth and final step involves the executive functions of inhibition, self-regulation and activation and, to a lesser extent, episodic memory (i.e. remembering the content of the task to be executed) in order to realize correctly the previous encoded intention.

Kvavilashvili and Ellis (1996) have described three types of remembering based on the nature of prospective cues: Event-based, Activity-based and Time-based. Specifically, Event-based prospective memory tasks are facilitated when a cue is present in the environment. The best example is a person who wishes to buy orange juice on the way home: prospective remembering "pops up" with the appearance of a grocery store. Activity-based prospective memory consists in achieving a specific action (e.g. , taking medication) in association with the realization of another action (e.g. when the person is going to the work) Finally, Time-based prospective memory tasks consist in remembering an intention at a specific time (e.g. 10 o'clock) or after a specific delay (e.g. in a 20-minute delay). A good example of a Time-based prospective memory event is meeting a colleague at a specific time and day or removing a cake from the oven after 30 minutes.

McDaniel and Einstein (2000) proposed a cognitive model in order to explain how prospective memory works. The Multiprocess Model involves two main modes of remembering: automatic and strategic. Furthermore, the authors have made a distinction between two types of cues: focal and non-focal. The first one includes all the information needed to realize a delayed intention during an ongoing task. The second targets the information available in the environment that is not necessary in achieving the prospective memory task. More specifically, the automatic processes are activated when the participant is in contact with a focal cue in the environment, which is sufficient when remembering the intended action (McDaniel, Robinson-Riegler, & Einstein, 1998;

McDaniel, Einstein, & Rendell, 2008). In this case, the frontal lobes could be less active. In fact, this remembering depends more on environmental cues and solicits more memory and attention than executive functions.

Strategic remembering implies higher cognitive resources because it supposes a voluntary monitoring during the ongoing task for prospective memory cues (McDaniel & Einstein, 2000). This process might be supported by the Supervisory Attention System (SAS), an attention-executive process (Norman & Shallice, 1986). The SAS facilitates encoding an association between an external event and the intended action; it monitors the environment and searches the targeted cue in order to indicate the right time to perform the action (Burgess & Shallice, 1997; Ellis, 1996). When the target is identified, the SAS interrupts the ongoing task, turns the attention toward the prospective task and lets the person realize the intended action. In summary, the role of the SAS in the Multiprocess model is to support the realization of the action plan, by the activation of intended scripts and by diminishing non-pertinent scripts.

An alternative model was drawn by Smith (2003): The Preparatory Attentional and Memory Processes Theory (PAM). This model suggests that preparatory mechanisms are necessary to realize Event-based prospective memory tasks. For Smith (2008), the consciousness in the performance of delayed intentions is crucial and explains why prospective remembering “is never automatic.” When the participant completes an ongoing task, the attention resources are limited and divided between the monitoring of

the prospective cues in the environment and the execution of the ongoing task. Even if the prospective cue is focal or non-focal, two complementary strategic monitoring processes mobilize the cognitive resources (Guynn, 2003; 2008): the retrieval mode and the target-checking mechanism. The first is a monitoring action that maintains the intention in mind. The second one is responsible for assessing the presence or not of prospective cues in the environment (Bisiacchi et al., 2011). To summarize, the preparatory processes are activated in the interval between the plan formulation and the execution of the intended action. When the attentional processes have targeted the prospective cue, the action plan is reactivated in the conscience and the preparatory memory processes permit the retrieval of information in order to execute the right action at the correct time.

For Burgess et al. (2011), several situations in everyday life require good prospective memory and executive capacities. In examining the complex phenomena involved in carrying out an intention, the experimenter's main challenge is to administer realistic tasks that have discriminatory powers. In the face of this challenge, researchers are beginning to see virtual reality (VR) as a means of representing real life in assessments. It is supposed that VR can reveal neurological deficits as they are encountered in daily life (Kinsella, Ong, & Tucker, 2009; Knight et al., 2005; Knight, Titov, & Crawford, 2006; Titov & Knight, 2005). The appeal of immersive assessments is that firstly, the subject is exposed to realistic stimuli and that secondly, the measure is easily standardized. Virtual reality is at the confluence of ecological assessment (in

which tasks are lifelike) and traditional assessment (in which reliability, standardization, and normalization are crucial). Virtual reality has been described as a tool for systematic, rigorous, and standardized assessment of cognitive functions (Schultheis & Rizzo, 2001; Tarr & Warren, 2002; Zhang, Abreu, Seale, Masel, Christiansen, & Ottenbacher, 2003). It also represents an ecologically valid means of measuring specific functions by allowing users to interact with computer-simulated objects and environments both in three dimensions and in real time, ‘as in real life’ (Pratt, Zyda, & Kelleher, 1995). More specifically, Knight et al. (2006) showed that virtual environments could reveal post-traumatic executive deficits in prospective memory. Kinsella et al. (2009) also showed that individuals with TBI were less precise in a virtual reality task when compared with a control group.

To date, eleven virtual environments have been reported in the literature to assess prospective memory and executive functions. The tasks used in those studies can be grouped into two main categories: (1) tasks that involve moving objects in a virtual apartment (Attrie, Dancey, & Pope, 2009; Brooks, Rose, Potter, Jayawardena, & Morling, 2004; Morris, Kotisa, Bramham, Brooks, & Rose, 2002; Sweeney, Kersel, Morris, Manly, & Evans, 2010) and (2) tasks that assess either action planning (Cromby, Standen, Newman, & Tasker et al., 1996; Klinger, Chemin, Lebreton, & Marié, 2006; Lee et al., 2003; Werner, Rabinowitz, Klinger, Korczyn, & Josman, 2009) or multitasking (Rand, Katz, Shahar, Kizony, & Weiss, 2005; Rand, Katz, & Weiss, 2007; Rand, Basha-Abu, Weiss, & Katz, 2009; Raspelli et al., 2009).

All virtual environments except one (Lee et al., 2003) have a demonstrated ability to help in identifying the participants' specific problems. In reviewing these environments, we have observed that all studies suffer from at least one 'methodological flaw' that diminishes both the psychometric quality and the ecological validity of the measure (from a verisimilitude point of view). Such flaws include: too few participants (Klinger, Chemin, Lebreton, & Marié, 2006; Lee et al., 2003; Rand, Katz, Shahar, Kizony & Weiss, 2005; Rand, Weiss, & Katz, 2009b; Raspelli et al., 2009; Zalla, Abreu, Seale, Masel, Christiansen, & Ottenbacher, 2001); too much disparity in the health conditions of the participants and difficulty in getting enough participants with lesions in the same areas of the brain (Lee et al., 2003; Morris et al., 2002; Rand et al., 2009a; Rand, Katz, & Weiss, 2007; Raspelli et al., 2009; Zalla et al., 2001); the nature of the tasks that is not completely naturalistic (Castelnuovo, LoPriore, Liccione, & Cioffi, 2003; Law, Logie, & Pearson, 2006; LoPriore, Castelnuovo, Liccione, & Liccione, 2003); no ongoing task (Knight, R. G., Harnett, & Titov, N., 2005); and finally, lack of data on the reliability of the measure (Attrie, Dancey, & Pope, 2009; Brooks, Rose, Potter, Jayawardena, & Morling, 2004; Castelnuovo et al., 2003; LoPriore et al., 2003; Morris et al., 2002; Rand et al., 2005; Rand et al., 2007; Sweeney, Kersel, Morris, Manly, & Evans, 2010; Zalla et al., 2001).

Three of the above-mentioned eleven research teams used virtual reality to describe the performance of individuals with acquired brain injury (traumatic brain injury, head

injury, cerebrovascular accident, encephalitis, surgical removal of astrocytoma) in executive functioning tasks: McGeorge, Phillips, Crawford, Garden, Della Sella, & Milne (2001); Sweeney et al. (2010); and Zalla et al., (2001). The study by McGeorge et al. (2001) compared the performance in the Virtual Errands Test between two groups of participants: one comprised of people with TBI and the other a control group. The Virtual Errands Test is analogous to Shallice and Burgess's (1991) Multiple Errands Test. In that study, the participants with a neurological condition accomplished significantly fewer of the required tasks than the control group in both the virtual environment and the real environment.

Sweeney et al. (2010) examined individuals with a variety of neurological problems (e.g. TBI, stroke, and encephalopathy). The group with neurological problems was paired with a control group. All participants had to perform a number of prospective memory tasks in a virtual warehouse. The participants with neurological problems performed similarly to those in the control group in Event-based and Activity-based prospective memory tasks. However, they performed significantly worse than the control group in Time-based tasks and broke the rules more often.

In Zalla et al. (2001), participants with various neurological problems (e.g. TBI, stroke, astrocytoma, brain aneurism) were paired with a control group. The experimental task was to formulate and then execute a plan of action on the theme of 'morning routine.' Participants with neurological problems performed at a level similar to that of

the control group in terms of action production performance and the number of actions executed. However, the experimental group committed many more errors than the control group with respect to the continuity and the consistency of the actions. Specifically, they performed more actions that failed, skipped more steps, expressed intentions without performing the actions, and started actions without finishing them.

Research Objectives and Hypotheses

Due to the lack of studies combining virtual reality and traumatic brain injury and the potential of VR as a good assessment tool, the goal of this study was to demonstrate that VR is an adequate means of detecting post-TBI cognitive problems. The principal objective of this research was to pursue further the questions of preceding scientific work in order to determine if the results obtained from the virtual reality tasks would allow contrasting participants between groups.

Method

Participants

Thirty-one individuals with TBI resulting from motor vehicle accidents participated in this study. The experimental group was composed of eight women and 23 men, all French-speaking. The mean age was 27 years (standard deviation = 11 years), and the

mean level of education was 12 years (standard deviation = 2.5 years). Seven of these participants had moderate TBI, while the other 24 had severe TBI. The mean elapsed time since the accident was 3.78 years (standard deviation = 2.5 years); these participants had been receiving treatment from a rehabilitation centre for some years after their TBI. Most participants had frontal lesions (left, right or bilateral); a few had lesions in the temporal region. Each participant's diagnosis was confirmed by a doctor when they were admitted to hospital, shortly after the accident.

The participants were contacted in accordance with the recruitment procedures at each of the four participating establishments. The establishments were all physical disability rehabilitation centres in the province of Québec, Canada: Le Bouclier, La Maison, InterVal, and Institut de Réadaptation en Déficience Physique de Québec (IRDPQ). All participants had previously completed the intensive functional rehabilitation phase and were living at home.

The control group was recruited from five workplaces in the province of Québec, Canada. They were employees of Le Bouclier, La Maison Rehabilitation Centre, University of Québec at Trois-Rivières, University of Québec in Abitibi-Temiscamingue and Drummondville CEGEP (a junior college.) This group was made up of eight women and 23 men, all French-speaking. The mean age was 27 years (standard deviation = 11 years), and the mean level of education was 12 years (standard deviation = 1.61 years).

Comparison of means for age [$F(1,60) = 2.21, p = 0.14$] and education level [$F(1,60) = 2.15, p = 0.15$] showed no significant difference between the groups for these variables.

Control measures

Kennedy, Fowlkes, Berbaim, and Lilienthal's (1993) Simulator Sickness Questionnaire (SSQ), translated into French by Bouchard, Renaud, Robillard, St-Jacques, Côté, and Cournoyer, (2003), was used to check for cybersickness, which is sometimes experienced in immersion. In the validation study, the authors found three factors with factor weights between 0.50 and 0.75. This questionnaire served as a control measure for the present study because individuals with TBI may be more susceptible to cybersickness.

Schubert, Friedman, and Regenbrecht's (2000) Igroup Presence Questionnaire (IPQ), translated into French and validated by Viaud-Delmon (2007), measures the sense of presence, i.e. the feeling of "really being there" in the virtual environment. The reliability studies have revealed three subscales: spatial presence, involvement, and realism. The overall scale used in this study had an acceptable level of reliability (0,85). IPQ was intended to verify the sense of presence as being equivalent in both study groups; a weak sense of presence might have indicated problems with involvement in the virtual reality task.

Prospective memory functional ‘paper and pencil’ tasks

The prospective memory ‘functional’ tasks used in this study were based on the approach adopted in the Rivermead Behavioural Memory Test (Wilson, Cockburn, & Baddeley, 1985). This procedure was similar to the one adopted by Kinsella, Murtagh, Landry, Homfray, Hammond, O’Beirne, Dwyer, Lamont, and Ponsford (1996). For the first task, *business card* (item name: CARD), the participant was told the purpose of asking for the researcher’s business card and was instructed to request it at the middle of the assessment session; the cue to realizing the intention was given by the experimenter who would say, “Now, we are reaching the midpoint of the assessment session.” If the subject failed to request the business card, the experimenter would prompt him or her. In the second task, *personal belonging* (item name: BELONGING), the participant was asked to lend the experimenter a personal belonging (e.g. a watch, a pen, etc.) which the experimenter hid. At the end of the experiment, the participant had to remember to collect it. The scoring system was inspired by the RBMT profile score: For remembering the action without a prompt, the participant received 2 points; for remembering the action with a prompt, 1 point; and finally, the participant had 0 points if he/she failed to remember the action with a prompt. The prospective memory functional ‘paper and pencil’ tasks were scored out of 4: CARD (maximum 2) + BELONGING (maximum 2). A high result indicated a good performance on functional prospective memory tasks. The experimenter would make sure the participant remembered all intentions before beginning the experiment. The ongoing task was considered to be the other tasks

performed by the participant (e.g. questionnaires, immersion, etc.) during the experiment.

Ecologically oriented immersive virtual reality experimental protocol

The virtual environment contains two different apartments named for the research, “smaller apartment” and “larger apartment.” Figure 1 shows an overview of the rooms and their contents. At the beginning of the immersion, the participant was in a central corridor. He/she then had to choose the first dwelling to visit. The smaller apartment consisted of three main rooms: bathroom, bedroom, and living room. Windows in both apartments permitted the participant to look outside. The larger apartment contained six rooms and was longer to visit: home office, living room, bedroom, bathroom, kitchen, and dinner room. While different, these apartments contained similar focal (aquarium, lease, and fan) and non-focal (bedroom, kitchen, counter, switch, etc.) prospective cues. Before the test, the participant was informed that he/she wanted to move to another city for personal or professional reasons; thus, the participant had to find a new home. An ongoing task consisted in actively visiting these two apartments. To be sure that the ongoing task was really cognitively demanding, the participant was asked to verbally describe both apartments and to comment on them according to his/her personal tastes. The participant was voice-recorded throughout the task.

Figure 1

The assessment in immersive virtual reality consisted of three different Event-based tasks. In the first, the participant had to acquire a lease, when going into the small apartment (item name: LEASE). Moreover, he/she was instructed that this document was important and contained all the rental conditions. Both apartments contained a lease but the one prepared by the owner for the subject was only in the small apartment. In order to ensure greater sensitivity in the virtual reality assessment score, the participant had absolutely to pick up the lease in the smaller apartment.

In the second task, realized in the larger apartment, when the clock showed 11:41 (the clock is static [i.e. the time shown never changes] and can be found in the bedroom), the participant had to feed a fish in the home office (item name: FISH). In order to ensure greater sensitivity in the virtual reality assessment score, the participant had to absolutely say aloud, “I am feeding the fish” while performing the action.

In the third task, the participant had to turn off a fan on his/her way out of the bedroom (item name: FAN) in the large apartment. The participant had to say aloud, “I am turning off the fan” while performing the action.

Scoring for these three virtual reality tasks was based on four criteria. The participant had to (a) perform the correct task (1 point), (b) at the correct time (1 point),

(c) in the right place (1 point), and (d) say aloud the performed action (1 point) for items FAN and FISH. For the item LEASE, the participant had to be careful and not to take the lease in the large apartment by accident. The maximum total score in the virtual reality test was 12: FISH (maximum 4) + FAN (maximum 4) + LEASE (maximum 4). A high result indicated a good performance in virtual reality tasks. Before being immersed, the participant had to demonstrate his/her understanding of all tasks and that he/she grasped the importance of verbalizing the actions and verbalizing his/her comments on the ongoing task. The participant was given no time limit to visit the apartments and was allowed to perform the tasks in any order. The experimenter made sure the participant remembered all intentions (and the ongoing task) before beginning the immersion.

The total time (TT) or total duration of the immersion was also measured. Each participant was given as much time as necessary to complete all the tasks and was free to complete them in any order. A short time was interpreted as a more effective strategy or as a better planning in carrying out intentions. (The TT may serve as an estimation of the quality of information processing. It also serves as a measure of the quality of managing interferences and cognitive overload brought on by the demands of the ongoing task.)

Materials and procedure

The virtual reality experiment was conducted using a personal computer (Dell XPS M1530; operating system: Windows Vista) equipped with an nVidia 8600M GTO

graphics card supporting video-game environments as well as an eMgin Z800 immersion lens (resolution: 600 x 800) with an integrated head tracker (360°horizontal and 60° vertical). Movements in the virtual environment were controlled with a standard Logitech mouse. The virtual environments used in this study were created by Bouchard et al. (2007) and inserted into the video game *Max Payne™*. Participants had to visit a virtual city (learning phase) and then visit the two virtual apartments. Questionnaires dealing with sense of presence and cybersickness were later completed; the results were compiled directly into a database using *FileMaker Pro 8™* software.

Results

Data distribution

The analysis of the data concerning the different tasks has shown that several variables were not distributed normally and that the variance was not equal. It was the case for the items BELONGING from functional tests and the items FISH, FAN, and Total score from VR protocol. Since most participants performed relatively well in the different tasks, data were distributed mainly to the right of the bell curve. For these reasons, we have decided to achieve a non-parametric analysis of variance with those variables. Finally, since the distribution was normal and variance homogeneous for control measures, we used parametric analysis with these variables.

Preliminary analysis

In most studies that use virtual reality technology, researchers monitor cybersickness and sense of presence experienced by participants in the virtual environment. It was supposed that physical illness or difficulty in feeling present in the virtual environment could have a negative effect on performance of prospective memory tasks. Our statistical tests of these variables indicated that the two groups did not differ in virtual reality sickness [$F(1, 60) = 0,023, p = 0,88$] or in the sense of presence [$F(1,60) = 0,433, p = 0,51$]. An analysis of means obtained for both groups led us to confirm that no participant in either group showed severe cyber-symptoms and that, on average, there was no cybersickness experienced after immersion (mean_{TBI group} = 0,42 ± 0,09; mean_{control group} = 0,40 ± 0,49; scale: 0–3). We were also able to confirm that participants in both groups felt “moderately present” on a Likert scale of 0–4 (mean_{TBI group} = 2,13 ± 0,33; mean_{control group} = 2,18 ± 0,31).

Measuring performance at functional and virtual tasks

The first specific analysis was to determine if participants with TBI and control participants differed significantly in their capacities to achieve functional and virtual tasks. To answer this question, firstly, we conducted a non-parametric Mann-Whitney U test by comparing the groups on these variables: 1) “total score from functional tasks”,

2) “total score from VR”, and 3) Total Time from VR (TT). Table 1 shows the descriptive statistics obtained from each group on the variables included in the study.

Table 1

The results showed that the TBI group were different from the healthy control participants on performance with virtual protocol ($U = 297,5; p < 0,01$) and TT ($U = 309,5; p < 0,01$) but not on functional total score ($U = 297,5; ns$).

Discriminatory ability of virtual reality assessment protocol

The second specific analysis was to determine if the results from the two assessment protocols made it possible to determine which group—TBI or control—an individual belongs to. To this end, a logistic regression analysis was conducted. This statistical tool gives greater control over the equation than discriminant analysis tests, which only allows analyzing the main effects (Tabachnick & Fidell, 2007). The main advantage of logistic regression in this research was its ability to produce the best equation in predicting the dependent variable (i.e. the variable ‘group’), the values of which were dichotomous in this case. This test, unlike discriminant analysis and multiple linear regression, does not require normal distribution or homogeneity of variance.

Indeed, the logistic regression used in this research is of the hierarchical (or sequential) type, thus allowing us to evaluate each predictor variables' contribution to the classification of participants by group. The equation was constructed by entering the VR tasks first because previous non-parametric analyzes have demonstrated better capacities of VR protocol for identifying deficits after a TBI. Next, the results of functional tasks were entered. TT was entered lastly because it was deemed complementary to the data on participants' success in virtual tasks. The logistic regression analysis made it possible to detect improvements in classification quality each time a new predictor variable was added to the others. Also, by dichotomizing predictor variables (0 = failure; 1 = success) based on the median, we were able to estimate the likelihood of obtaining a correct classification based on different values in the predictive variables.

In the first step of the analysis, the results were generated when the equation contained only the "constant." The χ^2 (85.95) of the log-likelihood test (-2LL) indicated that the constant alone is not sufficient to predict which group the participants belong to. This repartition is, in fact, comparable to what would be obtained in a random distribution.

In the second step, the results obtained for the VR tasks were entered into the logistic regression equation. We observed a significant change in the χ^2 (decrease of 7.94), which renders the model significant; the analysis indicates that the variable VR

alone is sufficient for classifying participants into their groups (classification rate = 61.3%).

As for the third step of the analysis, the predictive variable from functional tasks was entered into the equation in order to determine the variable's contribution. The log-likelihood test showed a slight change in the X^2 (decrease of 0.64). The combined scores (virtual reality tasks plus functional tasks) do not change the classification rate which stayed at 61.3%.

The final step of the analysis consisted in adding the predictors TT to the equation. The final X^2 is 70.78. This last step significantly lowered the initial X^2 by 15.17 ($p = 0.002$). A Hosmer–Lemeshow test also showed that the data adjusted well to the model ($X^2 = 12.08$; $p = 0.148$) after this step. This version of the equation showed discriminatory ability. We were thus able to comment on the model's predictive ability: Virtual Reality protocol (including the total time to achieve the task) makes it possible to predict correctly which group a participant belongs to 74.2% of the time.

Table 2 shows the final equation of the logistic regression analysis. Note that the variable VR total score and TT are significant when the other variables in the equation are kept constant and help to predict group membership. The functional score is not a variable that can predict which group participants belong to. The exp (B) indicates that when a participant has realized the task in the virtual reality protocol slower than

expected, he/she has 1.14 chances of being classified in the TBI group. Following the same logic, when he/she has a low virtual reality score, the participant has 0.75 chances of being in the TBI group. This finding demonstrates that the virtual reality total score and total time can serve as reliable predictors and are thus able to enhance the classification of participants by group.

Table 2

Discussion

This study was intended to explore the relevance of using virtual reality to identify cognitive problems after a TBI. To achieve this, 31 experimental participants, each with moderate or severe TBI resulting from a motor vehicle accident, were compared to 31 healthy adult participants. In the present section, the results will be examined in the following way: firstly, an analysis of the difference of between groups regarding the performance for functional and virtual assessment; secondly, a discussion on the results extracted from the logistic regression; thirdly and finally, a weighing of the strengths and weaknesses of this study.

Means difference obtained from virtual and functional assessment

The first research analysis centred on comparing participants' performance in two forms of cognitive assessment, one using virtual reality and the other a functional

‘paper-and-pencil’ protocol realized in the office. The results showed that participants in the TBI group performed similarly to the control group when functional tasks were used.

These results are similar to those obtained by Kinsella et al. (1996). These authors utilized a similar procedure concerning the construction of functional tasks. They observed a means difference between the TBI group and the control group only on one of the two items. For the present study, the “normal” performance concerning the TBI group to the functional task could be explained by the fact that cognitive disorders are not apparent because the assessment's environment is structured and silent (Sbordone, 2000). However, others pragmatic considerations need to be taken into account. Firstly, the sensitivity of these items seems not to be demonstrated by the logistic regression. The little number of items and their difficulty to convert the whole construct of prospective memory could explain these results. Some authors have observed that cognitive difficulties found in the TBI group are worse when the retrieval processes are auto-generated (Carlesimo, Casadio & Caltagirone, 2004), when the cognitive load is heavy (Maujean, Shum & McQueen, 2003) or when distractors are present during the realization of the task (Knight et al., 2006). Concerning the functional task presented here, in the light of the previous studies, it appears the task was too easy to expose a group difference.

On the other hand, statistical analyzes have revealed a group difference in the score resulting from VR-protocol. These results are compatible with those obtained by

Kinsella, Ong, and Tucker (2009) who used the Virtual Shopping Trip Task. They have demonstrated that the TBI participants were worse when compared to the control group when they had to perform tasks. These results paralleled those observed by Knight, Titov, and Crawford (2006). Indeed, the authors noticed a decrease in the performance of TBI participants (once again compared to the control group) in prospective memory in the Virtual Street environment designed by Titov and Knight (2005). These deficits could be created by the frontal lesions, frequently seen after a traumatic brain injury (Kliegel, Eschen, & Thöne-Otto, 2004).

Furthermore, statistical analysis has revealed that the TBI group was slower to complete the tasks in the virtual environment presented in this study in comparison with the control group. It is possible that the attention's alternation between ongoing and other cognitive tasks caused a slowdown in the information processing. This interpretation is compatible with the Preparatory Attentional and Memory Processes (PAM) model (Smith & Bayen, 2004). According to this model, the individual's attention resources are limited when the participant executes a prospective memory task. In other words, when an individual performs an ongoing task, he/she has fewer resources at his/her disposal in order to focus on prospective memory cues in the environment. The reverse is also true: supposing TBI impacts cognitive efficiency, we could logically conclude that the alternation process between monitoring prospective memory cues and the ongoing task may provoke a slowdown in the information speed processing. That hypothesis remains to be demonstrated in future research.

To put it succinctly, in the present study, participants with TBI achieved scores similar to those in the control group when assessed with functional tasks only. It is possible that this absence of differences between groups is due to a methodological weakness. In fact, using only two tasks creates a bias with regard to the internal validity of this research; this is owing to a lack of variance in the total score. When we analyze the means of each sub-score taken in functional tasks –as shown in Table 1 – the participants with TBI can perform well with items BELONGING and CARD. Furthermore, we could speculate that participants performed well at these tasks simply because they were too easy. On the other hand, participants with TBI were slower and did worse on virtual reality tasks than those in the control group. Even if these results were good, the same criticism may be made for all virtual reality tasks used in the present study: indeed, they could have been more sensitive to the phenomena under study had they been more complex.

Some suggest that ongoing tasks could be made more difficult by increasing the number of external distractions, thereby raising the level of cognitive overload and as a consequence the need for greater involvement. Maujean, Schumet, and McQueen (2003) have demonstrated that the complexity of ongoing tasks has an effect on the performance of prospective memory tasks. These authors have observed that participants with TBI did worse, compared to the control group, when the cognitive load on the ongoing task was high; conversely, TBI participants did better, compared to themselves, when the ongoing task was easier. However, these results contrast with those obtained

by Raskin, Buckheit, and Waxman (2012) who have demonstrated that the degree of difficulty of the ongoing task has an impact on the performance of the participants from the control group only. Those belonging to the TBI group were significantly worse whether the task was easy or difficult.

Results from the logistic regression

The second research analysis was to determine whether the virtual reality assessment procedure could serve to classify participants into groups (i.e. TBI or control). Our results showed that the whole assessment procedure - which includes VR and functional measures as well as total time to realize the task in the immersive protocol - could be used to correctly classify 74.2% of participants by group. The logistic regression analysis was used to determine each predictor variable's contribution to the classification of participants by group. In analyzing the components in the equation, we observed that the variables's VR total score and TT were the most reliable indicators; their inclusion in the model improved classification when the other variables were kept constant. More specifically, while looking closely at Table 2, we could see that the discrimination equation reveals better variables that can reliably identify TBI participants. Indeed, the EXP (B) shows that a low VR total score or a greater TT increases the chances of belonging to the TBI group.

To conclude, participants with TBI performed tasks more poorly and were less efficient, as they took more time to accomplish all the tasks. Sweeney et al. (2010) obtained similar results and suggested that these patterns may result from difficulty organizing and planning as well as susceptibility to cognitive overload in individuals with TBI. On the other hand, an examination of the classification table from the logistic regression analysis has shown ten individuals with TBI who performed at a level comparable to the control group. This could indicate a lack of sensitivity to the complete assessment protocol. This interpretation reinforces the idea that is necessary to make more complex the tasks as discussed previously. The classification table has also shown six control participants were classified as having TBI; this lack of specificity gives information about some variables that could be not considered in the research protocol. These include anxiety, ease with technology, subtle attention deficit, etc. More specifically, the false positives (i.e. the identification of six control participants in the TBI group) could be attributed to control participants' execution times that were more typical of participants with TBI (i.e. they had taken more time in average to complete the task.) This slower speed might be due to phenomena that could impede performance (e.g. performance anxiety or unfamiliarity with technology, etc.).

Strengths and weaknesses

A number of researchers, such as Brooks et al. (2004), have suggested using virtual reality to develop assessment tools as a means of avoiding the problem of the measure's

ecological representativeness. The goal remains to design exhaustive cognitive assessments that do not involve conducting tests in participants' homes and the logistical challenges the above would entail. Moreover, virtual environment can help to reproduce situations similar to those that the participant lives at home. Through virtual reality and computers, standardization of assessment can be achieved, thus permitting a higher control of various stimuli in order to increase cognitive demands and the management of interferences (Shultheis & Rizzo, 2000). The present study belongs to this current of research; our results have shown in fact that virtual reality is useful in distinguishing between individuals with TBI and those without. More specifically, the assessment procedure in this study offers acceptable reliability, as it minimizes the number of false negatives (i.e. erroneously classifying individuals with TBI as healthy); our statistical analyses have shown a success rate of 74.2% in the classification. These results are consistent with those of Matheis et al. (2007), who have demonstrated that virtual reality immersion represents a reliable means of assessing post-traumatic memory and learning problems in adults with TBI.

The results taken from this study have thus demonstrated the potential of virtual reality in identifying certain cognitive post-traumatic disorders. Even if the present assessment protocol can correctly identify a large proportion of TBI, some dimensions of cognitive everyday functioning seem to remain in all appearances unknown. As a complex phenomenon, prospective memory is a difficult to define from a neuropsychological perspective. Moreover, few studies used virtual reality with a

homogenous sample for the evaluation of this phenomenon following a TBI (e.g.: Kinsella et al., 2009; Knight et al., 2006; Sweeney et al., 2010). The present research seems to have contributed to the current knowledge of ecological neuropsychological assessment of cognitive function in an everyday-like situation. In fact, some parameters which have been extracted from the evaluation using virtual reality (i.e. VR total score and TT) and which identify differences between control and TBI groups are especially interesting. At the same time however, the immersive tool is limited, from a psychometric perspective, with some methodological weaknesses. Perhaps we should add items to the VR tasks in order to improve the classification rate. For example, it could be interesting to see if some tasks assessing self-generated cues, quality of realization, and efficiency would improve the discriminant value of this assessment tool.

Another way of improving the VR assessment protocol would be to add Time-based tasks in order to increase the difficulty of the assessment procedure. Knight et al. (2006) have shown that tasks are more demanding in terms of attention and time management. Time-based prospective memory tasks were more difficult for individuals with TBI to carry out because they have difficulty in managing distractions and dividing their attention. Under these conditions, executive deficits become more apparent and account for lower performances. Another strategy that could be used to raise the level of difficulty is to lengthen the tasks. A task longer than nine minutes (in mean for control group in the present study) might be more difficult in terms of cognitive resources. Finally, an interesting modification would be to raise the level of difficulty for the

ongoing task in order to verify if it could improve the discriminant power of the virtual reality protocol.

Conclusion

Over the course of this research, we found that virtual reality shows promise as an assessment tool for detecting cognitive problems as they are most likely to be experienced in real life, both in their subtleties and complexities. By offering a standardized procedure in an environment that simulates daily activities, virtual reality makes it possible to assess, in an interactive way, a person's capacity to coordinate multiple cognitive abilities. Using this procedure, we were able to classify correctly a high proportion of individuals by group (i.e. TBI or control). We observed that virtual reality total score and time spent carrying out the task were the most reliable variables in the discriminant equation. The observations discussed in the last section are of major importance in the future development of ecologically valid neuropsychological assessment tools.

Notwithstanding, the relative ease of these tasks constitutes the main drawback of this study. This probably compromises the psychometric quality of the tool because the data does not have a normal distribution. Accordingly, the protocol could be improved by adding items or by making the tasks more difficult. In a study on the multitasking ability of healthy subjects, Law, Logie, and Pearson (2004) showed that people's ability

to manage interruptions of a task could be distinguished from their ability to organize and perform multiple tasks in a limited time. Based on these results, two specific improvements to our procedure could be made: the first would be to impose time limits for certain tasks; the second would be to include unforeseen elements (e.g. answering the phone, closing the window when the wind is too strong, etc.) in the assessment, thereby requiring the individual to reorganize himself/herself while performing the ongoing task or intention. In a study on action planning, Klinger et al. (2006) observed that participants with Parkinson's disease took more time to complete the experiment; that they covered a greater distance; and that their movement was characterized by numerous stops, redundancies (e.g. retracing steps) and hesitations. In light of these findings, when reviewing the assessment procedure, we should examine the quality of the participants' action planning by measuring the efficiency of their movement within the apartments.

The ecological validity of this experimental procedure is another preoccupation that should be addressed in future research. In fact, we can identify the HMD and the mouse as technological limits to a realistic immersion. More specifically, the HMD eMagin z800 model has a diagonal field of view about 40 degrees that can bias the real sense of immersion. As a result, its 360 degree (horizontal) and 60 degree (vertical) head-tracking may facilitate a sense of presence and contribute to making the procedure immersive even if it is a "low immersive level."

Concerning the subjects who have participated in this study, they have similar characteristics as the samples in Kinsella et al. (2009) and Knight et al. (2006). Our TBI patients group was homogenous in terms of etiology because it included solely patients with TBI. However, because the areas affected and the degrees of impairment differ, we can argue with difficulty that this sample is really "pure." In order to understand the impact of the lesions on different cognitive components, another study could be conducted at which point experimental protocol solicits the frontal lobes. For this experiment, two groups could be created: one with TBI's "mostly frontal" and another with TBI's "mostly temporal."

In conclusion, this study shows that virtual reality is a promising means of assessing and observing cognitive functions. While we cannot demonstrate that this technology is an ecologic mean of assessment, we can, however, realize that virtual protocol seems to be more difficult than the functional tasks used here. In that way, we were able to bring to light cognitive dysfunctions after a TBI. Subsequent researchers could endeavour to obtain greater sensitivity/specificity in the assessment of prospective memory in an everyday-like situations by using complementary measures of executive functions; that psychometric methodology could be targeted to pursue the validation of virtual reality protocol in terms of a convergent/divergent validity procedure.

References

- Anderson, T., & Knight, R.G., (2010). The long-term effects of traumatic brain injury on the coordinative function of the central executive. *Journal of Clinical & Experimental Neuropsychology*, 32(10), 1074-1082.
- Attree, E .A., Dancey, C. P., & Pope, A. L. (2009). An assessment of prospective memory retrieval in women with chronic fatigue syndrome using a virtual reality environment: An initial study. *Cyberpsychology & Behavior*, 12, 379-385.
- Bisiacchi, P. S., Cona, G., Schiff, S., & Basso, D. (2011). Modulation of a fronto-parietal network in event-based prospective memory: An rTMS study. *Neuropsychologia*, 49(8), 2225-2232.
- Bouchard, S., Côté, S., & Richard, D. (2007). Virtual reality applications for exposure. In D. Richard, & D. Lauterbach (Eds), *Handbook of Exposure Therapies* (pp. 347-388). Florida, FL: Academic Press.
- Brooks, B. M., Rose, F. D., Potter, J., Jayawardena, S., & Morling, A. (2004). Assessing stroke patients' prospective memory using virtual reality. *Brain Injury*, 18(4), 391-401.
- Burgess, P. W., & Shallice, T. (1997). The relationship between prospective and retrospective memory: Neuropsychological evidence. In M. A. Conway (Ed.), *Cognitive models of memory*, (pp. 247-272). Cambridge, MA: The MIT Press.

- Burgess, P. W., Gonen-Yaacovi, G., & Volle, E. (2011). Functional neuroimaging studies of prospective memory: What have we learnt so far? *Neuropsychologia*, 49(8), 2246-2257.
- Carlesimo, G. A., Casadio, P., & Caltagirone, C. (2004). Prospective and retrospective components in the memory for actions to be performed in patients with severe closed-head injury. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 10(5), 679-688.
- Castelnovo, G., LoPriore, C., Liccione, D., & Cioffi, G. (2003). Virtual reality based tools for the rehabilitation of cognitive and executive functions: The V-STOR. *PsychNology Journal*, 3, 310-325.
- Cockburn, J. (1995). Task interruption in prospective memory: A frontal lobe function?" *Cortex*, 31, 87-97.
- Cromby, J. J., Standen, P. J., Newman, J., & Tasker, H. (1996). Successful transfer to the real world of skills practiced in a virtual environment by students with severe learning difficulties. *Proceedings of the First European Conference on Disability, Virtual Reality, and Assistive Technology*, 103–107.
- Ellis, J. (1996). Prospective memory or the realisation of delayed intentions: A conceptual framework for research. In M. Brandimonte, G. O. Einstein, & M. A., McDaniels (Eds), *Prospective memory: Theory and applications*, (pp. 1-22). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

- Fay, T., Yeates, O. K., Wade, S. I., Drotar, D., Stancin, T., & Taylor, G. H. (2009). Predicting longitudinal patterns of functional deficits in children with traumatic brain injury. *Neuropsychology, 23*(3), 271–282.
- Fleming, J., Riley, L., Gill, H., Gullo, M. J., Strong, J., & Shum, D. (2008). Predictors of prospective memory in adults with traumatic brain injury.” *Journal of the International Neuropsychological Society, 14*, 823–831.
- Franzen, M. D., & Wilhelm, K. L. (1996). Conceptual foundations of ecological validity in neuropsychological assessment. In R. J. Sbordone, & C. J. Long (Eds.), *Ecological validity of neuropsychological testing*, (pp. 91-112). Delray Beach, FL: St Lucie Press.
- Groot, Y. C. T., Wilson, B. A., Evans, J., & Watson, P. (2002). Prospective memory functioning in people with and without brain injury.” *Journal of the International Neuropsychological Society, 8*, 645–654.
- Guynn, M. J. (2003). A two-process model of strategic monitoring in event-based prospective memory: Activation/retrieval mode and checking. *International Journal of Psychology, 38*(4), 245.
- Guynn, M. J. (2008). Theory of monitoring in prospective memory: Instantiating a retrieval mode and periodic target checking. In M. Kliegel, M. A. McDaniel & G. O. Einstein (Eds.), *Prospective memory: Cognitive, neuroscience, developmental, and applied perspectives*, (pp. 53-76). New York, NY: Lawrence Erlbaum Associates.

- Kennedy, R. S., Fowlkes, J. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Use of a motion sickness history questionnaire for prediction of simulator sickness. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 63, 588–593.
- Kinsella, G. J. Ong, B., Tucker, J. (2009). Traumatic brain injury and prospective memory in a virtual shopping trip task: Does it matter who generates the prospective memory target? *Brain Impairment*, 10(1), 45-51.
- Kinsella, G., Murtagh, D., Landry, A., Homfray, K., Hammond, M., O'Beirne, L., Dwyer, L., Lamont, M., & Ponsford, J. (1996). Everyday memory following traumatic brain injury. *Brain Injury*, 10, 499–507.
- Kliegel, M., Eschen, A., & Thöne-Otto, A. I. T. (2004). Planning and realization of complex intentions in traumatic brain injury and normal aging. *Brain and Cognition*, 56(1), 43-54.
- Kliegel, M., Mackinlay, R., Jäger, T. (2008). A life span approach to the development of complex prospective memory. In M. Kliegel, M. A. McDaniel, & G. O. Einstein (Eds.), *Prospective memory: Cognitive, neuroscience, developmental and applied perspectives*, (pp. 29-52). New York, NY: Lawrence Erlbaum Associates.
- Klinger, E., Chemin, I., Lebreton, S., & Marié, R-M (2006). Virtual action planning in parkinson's disease: A control study. *Cybertherapy & Behavior*, 9(3), 342-347.
- Knight, R. G., & Titov, N., (2009). Use of virtual reality tasks to assess prospective memory: Applicability and evidence.” *Brain Impairment*, 10(1), 3-13.

- Knight, R. G., Harnett, M., & Titov, N. (2005). The effects of traumatic brain injury on the predicted and actual performance of a test of prospective remembering. *Brain Injury*, 19, 27–38.
- Knight, R. G., Titov, N., & Crawford, M. (2006). The effects of distraction on prospective remembering following traumatic brain injury assessed in a simulated naturalistic environment. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 12, 8-16.
- Kraus, J., & Sorenson, S. (1994). Epidemiology. In J. Silver, S. Yudofsky, & R. Hales (Eds.), *Neuropsychiatry of traumatic brain injury*. Washington, D.C.: American Psychiatric Press.
- Kvavilashvili, L., & Ellis, J. (1996). Varieties of intention: Some distinctions and classifications. In M. Brandimonte, G. O. Einstein, & M. A. McDaniel (Eds.), *Prospective memory: Theory and applications*, (pp. 23-51). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Law, A. S., Logie, R. H., & Pearson, D. G. (2006). The impact of secondary tasks on multitasking in a virtual environment.”*Acta Psychologica*, 122, 27–44.
- Lee, J. H., Ku, J., Cho, W., Hahn, W. Y., Kim, I. Y., Lee, S-M., Kang, Y., Kim, D.Y., Yu, T., Wiederhold, B., Wiederhold, M. D., & Kim, S.I. (2003). A virtual reality system for the assessment and rehabilitation of the activities of daily living. *Cyberpsychology & Behavior*, 6(4), 383-388.

- Lo Priore, C., Castelnovo, G., Liccione, D., & Liccione, D. (2003). Experience with V-STORE: Considerations on presence in virtual environments for effective neuropsychological rehabilitation of executive functions. *Cyberpsychology & Behavior*, 6(3), 281-287.
- Mangeot, S., Armstrong, K., Colvin, A. N., Yeates, K. O., & Taylor, H. G. (2002). Long-term executive function deficits in children with traumatic brain injuries: Assessment using the behaviour rating inventory of executive function (BRIEF). *Child Neuropsychology*, 8(4), 271-284.
- Mattheis, R. J., Schultheis, M. T., Tiersky, L. A., DeLuca, J., Millis, S. R., & Rizzo, A. (2007). Is learning and memory different in virtual environment? *Clinical Neuropsychologist*, 21(1), 146-161.
- Maujean, A., Shum, D., & McQueen, R. (2003). Effect of cognitive demand on prospective memory in individuals with traumatic brain injury. *Brain Impairment*, 4(2), 135-145.
- McDaniel, M. A., Einstein, G. O., & Rendell, P. G., (2008). The puzzle of inconsistent age-related declines in prospective memory: A multiprocess explanation. In M. Kliegel, M. A., McDaniel, & G. O. Einstein (Eds.), Prospective memory: Cognitive, neuroscience, developmental and applied perspectives, (pp. 141-160). New York, NY: Lawrence Erlbaum Associates.
- McDaniel, M. A., Robinson-Riegler, B. & Einstein, G. O. (1998). Prospective remembering: Perceptually driven or conceptually driven? *Memory & Cognition*, 26, 121-134.

- McDaniel, M. A., Glisky, E. L., Rubin, S. R., Guynn, M. J., & Routhieaux, B. C. (1999). Prospective memory: A neuropsychological study. *Neuropsychology, 13*, 103-110.
- McGeorge, P., Phillips, L. H., Crawford, J. R., Garden, S. E., Della Sala, S., & Milne, A. B. (2001). Using virtual environments in the assessment of executive dysfunction. *Presence, 10*, 375–383.
- Menon, D. K., Schwab, K., Wright, D. W., & Maas, A. L. (2010). Position statement: Definition of traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation, 91*, 1637-1640.
- Morris, R. G., Kotitsa, M., Bramham, J., Brooks, B., & Rose, F. D. (2002). Virtual reality investigation of strategy formation, rule breaking and prospective memory in patients with focal prefrontal neurosurgical lesions. *Prc. 4th Intl Conf. Disability, Virtual Reality and Assoc. Tech.* Hungary, 101-108.
- Pinkston, J. B., Santa Maria, M. P., Davis, R. D. (2000). Long-term outcome following moderate traumatic brain injury at age 3 months. *Brain and Cognition, 44*(1), 71-74.
- Pratt, D. R., Zyda, M., & Kelleher, K. (1995). Virtual reality: In the mind of the beholder.” *IEEE Computer, 28*(7), 17-19.
- Rand, D., Basha-Abu Rukan, S., Weiss, P. L., & Katz, N. (2009b). Validation of the virtual MET as an assessment tool for executive functions. *Neuropsychological Rehabilitation, 19*, 583–602.

- Rand, D., Basha-Abu Rukan, S., Weiss, P. L., & Katz, N. (2009). Validation of the virtual MET as an assessment Tool for executive functions. *Neuropsychological Rehabilitation*, 19, 583–602.
- Rand, D., Katz, N., & Weiss, P. L. (2007). Evaluation of virtual shopping in the VMall: Comparison of post-stroke participants to healthy control groups.” *Disability and Rehabilitation*, 13, 1–10.
- Rand, D., Katz, N., Shahar, M., Kizony, R., & Weiss, P. L. (2005). The Virtual Mall: A functional virtual environment for stroke rehabilitation. *Annual Review of Cybertherapy and Telemedicine*, 3, 193–198.
- Rand, D., Weiss, P. L., & Katz, N. (2009a). Training multitasking in a virtual supermarket: A novel intervention following stroke. *American Journal of Occupational Therapy*, 63, 535-542.
- Raskin, S. A., Buckheit, C. A., & Waxman, A. (2012). Effect of type of cue, type of response, time delay and two different ongoing tasks on prospective memory functioning after acquired brain injury. *Neuropsychological Rehabilitation*, 22(1), 40-64.
- Raspelli, S., Carelli, L., Morganti, F., Albani, G., Pignatti, R., Mauro, A., Poletti, B., Corra, B., Silani, V., & Riva, G. (2009). A neuro VR-based version of the Multiple Errands Test for the assessment of executive functions: A possible approach. *Journal of Cybertherapy and Rehabilitation*, 2(4), 299-313.
- Sbordone, R. J. (2000). Ecological validity issues in neuropsychological testing. *Brain Injury Source*, 4(4), 10-12.

- Sbordone, R. J., & Long, C. J. (1996). *Ecological validity of neuropsychological testing*. Delray Beach, FL : St Lucie Press.
- Schubert, T., Friedman, F., Regenbrecht, H. (1999). Decomposing the sense of presence: Factor analytic insights. *Extended Abstract to the 2nd International Workshop on Presence*, 1-5.
- Schultheis, M. T., & Rizzo, A. A. (2001). The application of virtual reality technology in rehabilitation. *Rehabilitation Psychology*, 46, 296–311.
- Shallice, T., & Burgess, P. W. (1991). Deficits in strategy application following frontal lobe damage in man. *Brain*, 114, 727-741.
- Shum, D., Fleming, J. M., & Neulinger, K. (2002). Prospective memory and traumatic brain injury: A review. *Brain Impairment*, 3(1), 1–16.
- Shum, D., Valentine, M., & Cutmore, T. (1999). Performance of individuals with severe long-term traumatic brain injury on time-, event-, and activity-based prospective memory tasks. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 21, 49–58.
- Smith, R. E. (2008). Connecting the past and the future :Attention, memory and delayed intentions. In M. Kliegel, M. A., McDaniel & G. O. Einstein (Eds.), *Prospective memory: cognitive, neuroscience, developmental and applied perspectives*, (pp. 29-52). New York, NY: Lawrence Erlbaum Associates.
- Smith, R. E., & Bayen, U. J. (2004). A multinomial model of event-based prospective memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 30, 756-777.

- Smith, R. E., (2003). The cost of remembering to remember in event-based prospective memory: Investigating the capacity demands of delayed intention performance. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 29*, 347-361.
- Sosin, D. M., Sacks, J. J., & Webb, K. W. (1996). Pediatric head injuries and deaths from bicycling in the United States. *Pediatrics, 98*(5), 868-870.
- Stuss, D. T., & Benson, D. F. (1986). *The Frontal Lobes*. New York, NY: Raven.
- Sweeney, S., Kersel, D., Morris, R. G., Manly, T., & Evans, J. J., (2010). The sensitivity of a virtual reality task to planning and prospective memory impairments: Group differences and the efficacy of periodic alerts on performance. *Neuropsychological Rehabilitation, 20*(2), 239-263.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2007). *Using multivariate statistics (5th ed.)*. Boston, MA: Allyn & Bacon/Pearson Education.
- Tarr, M. J., & Warren, W. H. (2002). Virtual reality in behavioral neurosciences and beyond. *Nature Neuroscience, 5*, 1089-1092.
- Titov, N., & Knight, R. G. (2005). A computer-based procedure for assessing functional cognitive skills in patients with neurological injuries: The Virtual Street. *Brain Injury, 19*(5), 315–322.
- Trudel, T. M., Scherer, M. J., & Elias, E. (2009). ROC: Part one. Understanding traumatic brain injury: An Introduction. *Exceptional Parent, 39*(11), 41-45.
- Viaud-Delmon (2007) iGrouppresence questionnaire (French translation). Web. 26 June 2012 <www.igroup.org/pq/ipq/download.php>

- Vriezen, E. R., & Pigott, S. E. (2002). The relationship between parental report on the BRIEF and performance-based measures of executive function in children with moderate to severe traumatic brain injury." *Child Neuropsychology, 8*(4), 296-303.
- Werner, P., Rabinowitz, S., Klinger, E., Korczyn, A. D., & Josman, N. (2009). Use of the virtual action planning supermarket for the diagnosis of mild cognitive impairment: A preliminary study. *Dementia & Geriatric Cognitive Disorders, 27*, 301-309.
- Wilson, B. A., Cockburn, J., & Baddeley, A. (1985). *The Rivermead Behavioral Memory Test*. Titchfield, UK: Thames Valley Test.
- Wilson, B. A., Evans, J. J., Emslie, H., Zangwill, O., Alderman, N., & Burgess, P. W. (1998). The development of an ecologically valid test for assessing patients with a dysexecutive syndrome. *Neuropsychological rehabilitation, 8* (3), 213–228.
- Zalla, T., Plassiart, C., Pillon, B., Grafman, J., & Sirigu, A. (2001). Action planning in a virtual context after prefrontal cortex damage. *Neuropsychologia, 39*, 759–770.
- Zhang, L., Abreu, B. C., Seale, G. S., Masel, B., Christiansen, C. H., & Ottenbacher, K. J. (2003). A virtual reality environment for evaluation of a daily living skill in brain injury rehabilitation: Reliability and validity." *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation, 84*(8), 1118-1124.

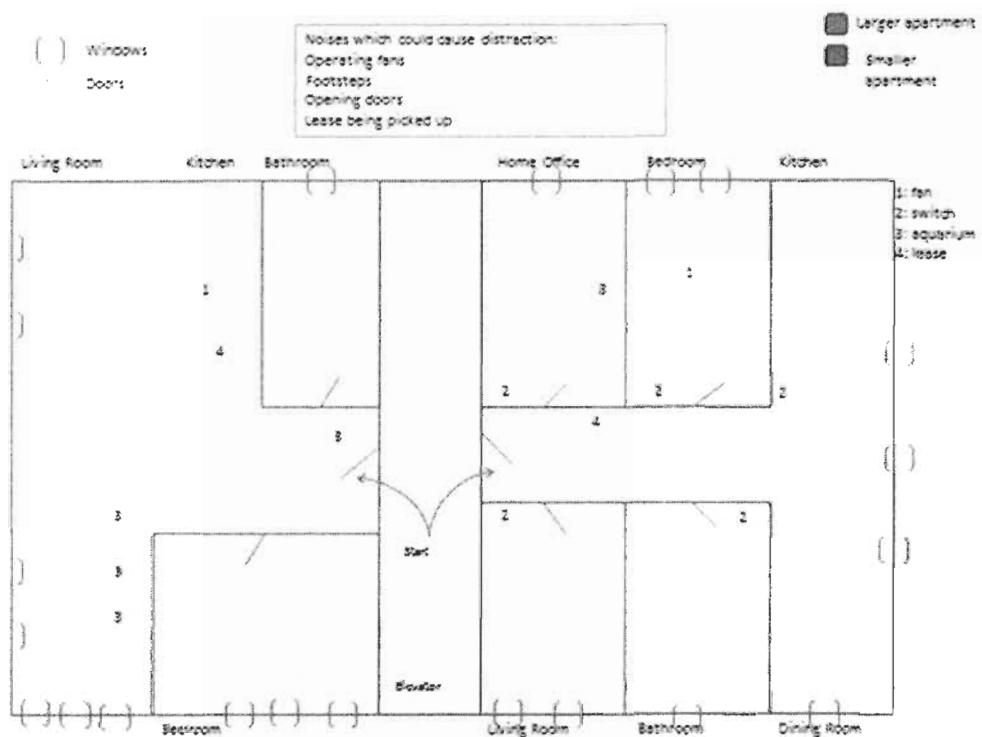


Figure 1. Virtual environment layouts used in the experiment.

Table 1

Means and standard deviations obtained for each measure concerning prospective
memory

Item	Group	Mean	SD	Min.	Max.
CARD	Control	1.07	0.93	0	2
	TBI	1.36	0.84	0	2
BELONGING	Control	1.65	0.55	0	2
	TBI	1.39	0.80	0	2
Functional total score	Control	2.71	1.30	0	4
	TBI	2.74	1.57	0	4
TT (min.)	Control	9.45	3.90	5	22
	TBI	13.48	9.07	5	54
FISH	Control	3.55	0.89	0	4
	TBI	2.90	1.40	0	4
FAN	Control	3.23	1.23	0	4
	TBI	2.32	1.64	0	4
LEASE	Control	2.90	1.19	0	4
	TBI	2.26	1.34	0	4
VR total score	Control	9.68	2.37	4	12
	TBI	7.48	3.55	0	12

Table 2

Logistic regression equation: results by variable

	B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Step 1 ^a	VR total score	-0.28	0.11	6.92	1	0.01
	Functional score	0.15	0.21	0.52	1	0.47
	TT	0.13	0.06	4.25	1	0.04
	Constant	0.58	1.18	0.24	1	0.62

Discussion générale

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse avaient pour principal objectif de démontrer la pertinence d'utiliser la réalité virtuelle afin de soutenir l'évaluation neuropsychologique selon une approche écologique. Pour ce faire, deux études complémentaires, utilisant le même protocole d'évaluation, ont été réalisées. La première visait à identifier les qualités psychométriques de la mesure alors que la seconde voulait déterminer son pouvoir discriminant auprès d'une population dite clinique. Les travaux réalisés dans le cadre de la démarche doctorale s'appuient sur un cadre théorique dont la richesse repose sur l'association des construits de la mémoire prospective et de l'évaluation écologique. Ainsi, il est important de noter qu'un effort a été fait pour tendre vers une mesure écologique par l'utilisation d'un protocole de recherche immersif, utilisant la réalité virtuelle, dont les tâches s'apparentaient aux exigences du quotidien. Ces deux études s'inscrivent donc dans une approche écologique de type vérisimilitude telle que définie par Franzen et Wilhelm (1996). Selon ces auteurs, la vérisimilitude est un aspect général de la validité écologique dans lequel la méthode de cueillette de données est similaire aux tâches et habiletés requises dans un environnement libre et ouvert (*free and open environment*). Le présent chapitre vise principalement à discuter les résultats obtenus sous deux principaux angles : méthodologique et théorique. Enfin, cette section se conclut par une réflexion sur l'impact que les nouvelles technologies peuvent avoir sur la mesure, le tout abordé selon une approche écologique.

L'analyse psychométrique des protocoles d'évaluation utilisés

L'étude présentée au chapitre 1 a décrit un outil d'évaluation dont la construction est principalement basée sur une revue exhaustive des composantes théoriques traitant de la mémoire prospective. Le protocole d'évaluation en réalité virtuelle consistait à faire vivre à un participant une immersion dans un environnement virtuel et à lui demander de visiter deux appartements dans le but de louer l'un d'eux. La tâche concurrente consistait à se promener dans l'environnement virtuel tout en le décrivant en fonction de ses goûts et intérêts, conformément à la mise en situation initiale. Tel que décrit dans le tableau 4, les trois tâches *fan*, *fish* et *lease* devaient également être réalisées pendant l'immersion et étaient concurrentes à la description des appartements. L'item *fish* est de type *event-based* alors que les items *fan* et *lease* sont de type *activity-based*.

Le protocole virtuel a été construit sur la base des critères spécifiques, reconnus dans les écrits scientifiques, comme étant valides pour la construction d'une tâche de mémoire prospective. Les travaux retenus pour l'élaboration de ces critères sont ceux de Burgess, Scott et Frith (2003), de Burgess, Gonen-Yaacovi et Volle (2011) et de McDaniel et Einstein (2007). Malheureusement, sur la base des résultats obtenus dans le cadre de la première étude, tout en considérant ses défauts méthodologiques, il est impossible de dire si ces tâches ciblent réellement la mémoire prospective. Cette affirmation est d'autant plus vraie que la tâche concurrente n'était peut-être pas suffisamment exigeante pour mobiliser les ressources attentionnelles conformément au principe du PAM de Smith (2003).

Tableau 4

Caractéristiques des tâches utilisées dans le protocole immersif de réalité virtuelle

Tâches	Délai de réalisation (immédiat ¹ ou différé)	Interruption de la tâche concurrente	Type de tâche	Indice prospectif (focal)	Indices non focaux présents dans l'environnement	Saillance de l'indice
<i>Fish</i>	Différé	Oui, car il faut revenir dans la pièce où se trouve le poisson et verbaliser l'action.	<i>Event-based</i>	Heure du cadran dans la chambre	Il y a plusieurs aquariums dans le petit appartement.	Non
<i>Lease</i>	Immédiat si le participant commence par le petit appartement ²	Oui, car il y a interruption de la description des appartements. Le participant doit prendre le bail et s'assurer que c'est le bon. La plupart du temps il valide verbalement auprès de l'expérimentateur que c'est bien le document recherché.	<i>Activity-based</i> (reliée à l'action : en entrant dans le loft)	Document sur le comptoir	Il y a un autre bail dans le grand appartement.	Oui
<i>Fan</i>	Différé	Oui car le participant doit s'arrêter pour verbaliser l'action.	<i>Activity-based</i> (reliée à l'action : en sortant de la chambre)	Son/interrupteur sur le mur ou ventilateur au plafond	Il y a un autre ventilateur dans le petit appartement avec interrupteur.	Non

¹Une réalisation immédiate de l'intention se fait dans un délai d'une à deux minutes (Graf & Uttl, 2001).² 55 % des participants ont commencé leur visite virtuelle par le petit appartement.

Ainsi, il n'est pas possible de dire que le protocole immersif possède une bonne validité apparente (ou de contenu) sur la base des critères retenus. Certes, il est vrai de dire que 1) l'exécution de l'action n'est pas immédiate (sauf pour l'item *lease* dans 55 % des cas); 2) le temps pour initier la réponse est restreint (c'est-à-dire que la personne exécute l'action immédiatement après avoir vu l'indice focal) : 3) le cadre temporel pour l'exécution de la réponse est limité (chaque action se réalise en quelques secondes) et 4) il y a plusieurs intentions à réaliser (McDaniel & Einstein, 2007). Il est aussi possible de dire que : 1) chaque tâche prospective possède son indice de rappel (voir tableau 4 pour des précisions); 2) les actions sont auto-initierées (c'est-à-dire que le chercheur ne joue pas de rôle actif dans le rappel des tâches prospectives); et 3) le participant ne reçoit pas de rétroaction à propos de la réalisation de ses tâches. Cependant, tous les critères soulevés comme étant essentiels pour développer une tâche de mémoire prospective selon Burgess et al. (2003) ne sont pas complètement répondus. En effet, bien que la tâche prospective soit imbriquée dans une activité concurrente, cette dernière ne mobiliserait pas suffisamment les ressources cognitives du participant. Ceci semble vraisemblable malgré le fait que de naviguer dans l'environnement virtuel par le biais de la souris et du visiocasque pourrait également avoir un effet sur la gestion des ressources cognitives en accaparant, entre autres, les ressources attentionnelles.

Dans le même ordre d'idées, en ce qui concerne l'item *lease*, dont l'exécution pouvait se faire immédiatement si le participant débutait sa visite par le petit appartement, il pourrait ne pas être conforme au premier critère d'une tâche de mémoire

prospective tel que décrit par McDaniel et Einstein (2007). Puisque 55% des participants ont commencé par une visite du petit appartement, cela peut apparaître comme un manque de validité apparente de l'outil, du moins pour cet item. Or, étant préoccupé par cette question, des analyses statistiques *a posteriori* ont été réalisées. Pour ce faire, le groupe de la première étude a été fractionné en deux sur la base du premier appartement visité (groupe 1 = participants ayant débuté la visite par le petit logement [$n = 51$]; groupe 2 = participants ayant commencé la visite par le grand appartement [$n = 41$]). Les résultats obtenus ont démontré qu'il n'existe pas de différence en ce qui concerne la performance à l'item *lease* sur la base du premier environnement visité ($F(1, 90) = 3,65$; *ns*). Ceci laisse croire que le moment de réalisation pour cet item (c.-à-d. immédiat ou différé) n'a pas affecté la performance des participants.

Par ailleurs, les analyses psychométriques du premier chapitre ont été réalisées selon une procédure de validation par critère. Ainsi, le protocole expérimental résumé dans les paragraphes précédents a été comparé à un test critère reconnu comme étant représentatif du construit de la mémoire prospective. L'étaillon choisi à cet effet était constitué de la somme de deux items inspirés par le *Rivermead Behavioural Memory Test* (RBMT). Cette procédure est similaire à celle utilisée par Kinsella, Murtagh, Landry, Homfray, Hammond, O'Beirne, Dwyer, Lamont et Ponsford (1996). Cet étaillon, conformément à ce qui a été suggéré par Chevignard, Soo, Galvin, Catroppa et Eren (2012), a été classifié sous le registre des « tests fonctionnels de type papier-crayon ».

réalisés dans un bureau¹ ». Ce genre d'épreuve, à l'instar des sous-tests de mémoire prospective du RBMT, est depuis longtemps considéré comme créant un pont entre les mesures de type laboratoire et les questionnaires basés sur l'auto-observation de comportements tels que survenant dans le quotidien (Wilson, Cockburn, Baddeley, & Hiorns, 1989). Plus spécifiquement l'item *card* du protocole dit « fonctionnel » consistait à demander la carte professionnelle du chercheur à la mi-temps de l'expérimentation. L'item *belonging*, pour sa part, consistait à demander au chercheur un objet personnel préalablement prêté et ce, à la fin de l'expérimentation. Les détails sur ces tâches, qui ont été étiquetées comme étant des « tâches fonctionnelles » dans la présente thèse, se retrouvent dans les sections méthodologiques des chapitres 1 et 2.

Au terme des analyses statistiques, les résultats obtenus ont été décevants et les hypothèses de recherche invalidées. En effet, il a été possible de voir qu'il n'existe pas de corrélation entre le score global du protocole immersif et le score global de l'échelle « fonctionnelle ». Les analyses corrélationnelles de type « item-item » ont également démontré que les items du critère et ceux du protocole immersif ne sont pas en relation réciproque. À l'intérieur des échelles elles-mêmes, il a été possible de voir que les items *fish* et *lease* ne sont tout simplement pas en corrélation et que les items *fish* et *fan* possèdent une faible corrélation ($r[92] = 0,28$). La corrélation entre les items *card* et *belonging* de l'échelle fonctionnelle est également faible ($r[92] = 0,24$). Enfin, et ce à

¹ Functional 'paper and pencil' task performed in an office.

titre indicatif, les corrélations item-tout par échelle (c.-à-d. virtuelle et fonctionnelle) sont significatives et élevées, allant de 0,56 à 0,90.

Ces résultats, tels que présentés, laissent supposer que le protocole immersif possède une validité de critère pauvre ne permettant pas de dire qu'il évalue bien la mémoire prospective. En effet, il ne semble pas parvenir à « classer l'objet de mesure en fonction de ce qu'il prétend mesurer » (Laurencelle, 1998). Ceci serait dû au fait qu'il contient des éléments de mesure encore « inconnus ». Autrement dit, l'erreur de mesure attribuable à plusieurs facteurs (p. ex. : instabilité de la caractéristique mesurée, imprécisions dans la lecture du résultat, influences incontrôlables des conditions de l'environnement, hasard, etc.) semble prendre une part importante de la variance. Ici, deux interprétations ou hypothèses peuvent s'appliquer : soit le protocole virtuel est un outil dont le construit théorique a été mal ciblé et qu'il mesure autre chose que ce qu'il prétend mesurer, soit le critère choisi pour établir la comparaison n'était pas le bon compte tenu des dimensions couvertes par le construit de la mémoire prospective. La première hypothèse pourrait être questionnée, car les items issus du protocole virtuel démontrent une représentativité acceptable du domaine investigué. Toutefois, un doute persiste du fait qu'ils ne se conforment pas à tous les critères d'une « bonne » tâche de mémoire prospective selon Burgess et al. (2003; 2011) ainsi que selon McDaniel et Einstein (2007).

Concernant le choix de critère, quelques études ont analysé des items comparables à ceux utilisés dans cette thèse. D'abord, Umeda, Kato, Mimura, Kashima et Koyazu (2000) ont réalisé une étude test-retest de l'item *belonging* du RBMT. Le coefficient de corrélation entre la première administration et la seconde, trois mois plus tard, était de 0,86, démontrant ainsi une bonne fidélité. Toutefois, il est reconnu qu'un item ou qu'un test peut être fidèle sans nécessairement être valide (Laurencelle, 1998). Pour leur part, Kinsella et al. (1996) ont démontré le pouvoir discriminant d'un item comparable à celui identifié comme étant *card* dans la présente étude. Ils demandaient aux participants de rappeler au chercheur de procéder à l'administration d'un questionnaire à un moment précis de l'expérimentation. Les auteurs ont démontré que les personnes ayant un traumatisme craniocérébral (TCC) performaient significativement moins bien lorsque comparées à un groupe témoin, supportant ainsi le potentiel discriminant de cet item. Malgré les résultats obtenus dans le cadre de ces deux études, il n'en demeure pas moins que la validité de contenu de ces items peut être questionnée. Il en va de même pour les items *card* et *belonging* de la présente étude. Le principal défaut de ces tâches concerne la mobilisation du participant à la recherche d'indices prospectifs présents dans l'environnement. En effet, selon Simth et Bayen (2004), les processus de monitorage sont une composante essentielle au fonctionnement de la mémoire prospective. Cette réflexion est complétée par Potvin, Rouleau, Audy, Charbonneau et Giguère (2011) qui ont souligné que « certains tests disponibles pour évaluer la mémoire prospective, [dont le RBMT], présentent une fiabilité, une sensibilité et une validité limitées par certains pièges méthodologiques » [traduction libre] (p.193) . Entre autres, les stimuli utilisés et

le contexte à l'intérieur duquel l'intention est réalisée sont souvent éloignés de ce qui se passe réellement dans la vie quotidienne. Ce point pourrait expliquer les différences entre les résultats obtenus aux items des tâches dites fonctionnelles (lesquelles il conviendrait de regrouper sous l'aspect véridicalité¹ de la validité écologique) et ceux obtenus en réalité virtuelle (tâches qui s'approchent de la vérissimilitude). Enfin, ce manque de représentativité du quotidien de la mesure dite « fonctionnelle » pourrait également être considéré comme un biais à la généralisation en dehors du contexte d'évaluation (Burgess, Alderman, Forbes, Costello, Coates, Dawson, Anderson, Gilbert, Dumontheil, & Channon, 2006).

Selon Laurencelle (1998), l'analyse d'items est une procédure dont l'objectif est de soutenir le concepteur du test dans la mise au point de l'ensemble des contenus de son outil de mesure. Cette étape est donc préalable à la validation, qui prend par la suite différentes formes, dont celle de la validation de critère comme dans le cas du premier chapitre de cette thèse. Selon Davis (1966), une analyse d'items, telle que présentée dans la première partie du premier chapitre, vise à évaluer la qualité d'un outil de mesure de même que celle des items qui le composent. Cette analyse peut se faire par la comparaison des résultats tirés du nouveau protocole à ceux issus d'une mesure étalon. Puisqu'il arrive souvent qu'une telle mesure fasse défaut, l'auteur suggère d'utiliser en tant que critère de comparaison le score total obtenu au test. Par conséquent, en utilisant cette méthode d'analyse, il serait possible de dire que l'outil développé en réalité virtuelle

¹ Selon Franzen et Wilhelm (1996), la véridicalité représente la mesure avec laquelle les résultats d'un test peuvent refléter ou prédire le phénomène tel qu'il survient dans « la vraie vie ».

possède certaines qualités au plan psychométrique puisque les items peuvent être, sur la base des coefficients de corrélation, qualifiés d'adéquats (regroupant les coefficients de corrélation de 0,30 à 0,69) à excellents (regroupant les coefficients de corrélation allant de 0,70 à 1,00). Plus spécifiquement, en se basant sur les corrélations items-tout, il serait possible de dire que l'item *fish* ($r[92] = 0,56$) se distingue des items *fan* ($r[92] = 0,74$) et *lease* ($r[92] = 0,70$) en présentant un coefficient de validité plus faible. Cette démonstration laisse entendre que cet outil pourrait potentiellement être valide sur la base des corrélations items-tout et que le principal problème consiste à ne pas avoir sélectionné un étalon compatible avec ce nouvel instrument de mesure. Des inconnus demeurent donc, tel que déjà mentionné, au plan de la mesure. Par ailleurs, en plus de posséder des lacunes au plan de la validité, le protocole immersif d'évaluation possède une très faible fidélité ($\alpha = 0,42$). Ce qui en fait, selon les indices de classement du coefficient de fidélité, un instrument de mesure peu utile, comportant beaucoup trop d'hétérogénéité. Bref, ce résultat indique que cet outil peine à reproduire, d'une situation d'évaluation à l'autre, les résultats obtenus.

À la lumière de ce qui précède, il est possible de dire que les « inconnus » mis en relief par les faibles corrélations émanent de problèmes méthodologiques sur le plan de la sélection du critère ainsi que sur le plan de la construction des items en réalité virtuelle. Il faut conclure que d'avoir sélectionné « seulement deux items » pour procéder à une démarche de validation par critères, considérant la complexité du construit théorique de la mémoire prospective, n'était pas une avenue qui permettait de

répondre aux objectifs de la recherche. Il est possible de suggérer que les deux items de la catégorie des tests fonctionnels manquent de richesse pour réaliser une juste observation de la mémoire prospective. Ainsi, il n'est pas surprenant d'avoir obtenu un plafond relativement bas au plan des analyses corrélationnelles (voir les petits coefficients de corrélation). Par conséquent, il semble y avoir beaucoup d'hétérogénéité entre les items, ce qui laisse penser que plusieurs autres items, peut-être même classifiés selon des échelles différentes, auraient été pertinents. Par exemple, sachant que la mémoire prospective implique les fonctions exécutives, dont le monitorage, l'alternance de l'attention, la planification, etc., des items mesurant ces aspects auraient été tout à fait pertinents. Tout cela mène à deux conclusions concernant les items retenus dans la présente recherche : 1) une grande hétérogénéité est constatée entre les items (tel que suggéré par l'analyse de consistance interne), ce qui laisse à penser qu'il en faut davantage pour bien circonscrire le concept à l'étude 2) le choix des items pour évaluer la validité par critère du protocole utilisant la réalité virtuelle n'était pas adéquat.

Cette réflexion permet d'observer que les deux approches évaluatives utilisées (c.-à-d. les protocoles virtuel et fonctionnel) possèdent certains défauts au plan de l'étendue de la mesure. Selon Laurencelle (1998), l'étendue représente la sensibilité de l'instrument dans sa fonction de classement. Autrement dit, les outils analysés ne couvrent assurément pas le concept de la mémoire prospective dans sa globalité. Par ailleurs, un autre aspect important qui est remis en question concerne la justesse de la mesure. La justesse renvoie ici à l'unité de mesure utilisée. Dans la présente recherche,

la mesure ne permet pas un classement suffisamment précis des participants. En effet, l'étendue des scores de chaque item (0-2 pour l'échelle fonctionnelle et 0-3 pour l'échelle virtuelle) n'est pas suffisamment grande pour bien distribuer les participants selon une courbe normale. Enfin, bien que l'insertion de tâches de type *time-based* aurait enrichi la procédure d'évaluation, l'absence de celles-ci ne constitue pas nécessairement un défaut de la mesure. En effet, des tâches de mémoire prospective de type *event-based* sont très fréquemment utilisées en recherche pour étudier le phénomène (Burgess et al., 2011). Toutefois, l'insertion de tâches de type *time-based* aurait permis d'avoir une vision plus globale du fonctionnement des personnes en ce qui concerne la mémoire prospective, surtout que l'intérêt ici était de reproduire le plus précisément possible le fonctionnement quotidien.

Afin de pallier l'ensemble de ces nombreux problèmes de mesure, il aurait été intéressant de sélectionner des outils d'évaluation complémentaires pour effectuer les analyses. Ainsi, des tests des fonctions exécutives auraient été très pertinents selon une approche de validité convergente et divergente. Ceci aurait compensé pour la rareté des outils d'évaluation de la mémoire prospective (Brooks, Rose, Potter, Jayawardena, & Morling, 2004). C'est en utilisant cette stratégie que Rand, Rukan, Weiss et Katz (2009a) ont été en mesure d'établir la spécificité et la sensibilité de leur *Virtuel Errand Test*. Le protocole de mémoire prospective aurait également dû contenir plus d'items de même nature permettant de couvrir le phénomène avec plus de précision. En synthèse, il est possible de dire que, tel que présenté dans le premier chapitre, l'approche par critère

aurait donné de meilleurs résultats pour la validation du protocole immersif si l'étalement choisi avait été en mesure de couvrir l'entièreté du construit de la mémoire prospective. Par ailleurs, puisque les items ont été adaptés du RBMT et qu'aucune donnée de validité préalable n'existe pour eux, il est même possible de questionner le fait qu'ils mesurent bel et bien la mémoire prospective. Néanmoins, cela demeure un obstacle majeur pour toute étude de ce type en raison des tests, peu nombreux, actuellement disponibles pour l'évaluation clinique de la mémoire prospective.

La deuxième étude, présentée dans le second chapitre de la thèse, visait à identifier le pouvoir discriminant d'une approche évaluative combinant les items fonctionnels et virtuels mesurant ce qu'il serait dès lors possible de nommer une situation de *multitasking*. Burgess (2000) a démontré que des situations concrètes de la vie quotidienne, caractérisées par leur complexité et le fait qu'il existe peu de contraintes extérieures pour les structurer, exigent certaines habiletés à organiser, planifier et structurer des tâches multiples, d'où le terme de *multitasking*. Ainsi, le *multitasking* nécessiterait des habiletés d'engagement, par le biais de sa propre motivation, dans la réalisation de tâches qui sont à la fois concurrentes et interfoliées (Burgess, 2000) et ce, dans un contexte spécifique. Donc, dans le chapitre 2, cette combinaison des items a été réalisée, a priori, sur la base des réflexions engendrées par la première étude. En effet, il était attendu, en augmentant le nombre d'items imposant une situation de *multitasking*, que le concept cognitif soit mieux couvert dans sa globalité. Plus spécifiquement, la seconde étude visait à vérifier si ce protocole « plus complet » d'évaluation pouvait

départager, selon les groupes, les personnes ayant un traumatisme craniocérébral (TCC) modéré ou grave et les personnes du groupe témoin sans antécédents neurologiques. Les paragraphes qui suivent ont comme objectif d'approfondir la discussion portant sur les résultats obtenus dans la seconde étude. Ainsi, la tâche concurrente sera analysée sous un angle théorique. Les différences de moyenne entre les groupes aux items fonctionnels et virtuels, puis l'analyse de régression logistique, seront discutées plus en détail.

En ce qui concerne la tâche concurrente, il aurait été intéressant d'obtenir une mesure de la mobilisation des participants au cours des processus de vérification (*target checking mechanism*) (Bisiacchi, Cona, Schiff, & Basso, 2011; Guynn, 2008) afin d'être certain, hors de tout doute, qu'elle soit ou non suffisamment mobilisatrice sur le plan des fonctions attentionnelles. Plus spécifiquement, ces processus de vérification permettent l'alternance de l'attention entre la tâche concurrente et la tâche prospective. Selon Guynn (2003, 2008), les processus de vérification peuvent être observés lorsque la personne recherche les cibles prospectives dans l'environnement. Ainsi, il apparaît après réflexion que des mesures d'engagement sur la tâche concurrente et de monitorage, à la recherche des cibles prospectives, auraient permis de mieux définir les processus impliqués dans le succès des tâches proposées aux participants. En plus de se conformer à l'idée d'effectuer une évaluation écologique du fonctionnement quotidien (parce que ces observations se conforment bien à ce qui se passe dans la réalité), ce type de mesures aurait été cohérent avec le modèle neuropsychologique de la mémoire prospective qui a démontré que l'alternance entre la tâche concurrente et les processus de vérification se

fait par l'activation/désactivation de régions cérébrales distinctes. A cet effet, une étude récente menée par Bisiacchi, Cona, Schiff et Basso (2011) a examiné l'apport des lobes frontaux lors de la participation à des tâches de type *Event-based*. Le cadre théorique des auteurs se basait sur les travaux de Guynn (2003, 2008) qui avait décrit, tel que mentionné en introduction, deux processus indépendants dans le monitorage de l'environnement à la recherche des cibles prospectives : le mode rappel (*retrieval mode*) et le mécanisme de recherche des cibles (*target checking mechanism*). Au terme de leur recherche, ils ont découvert que les lobes frontaux jouaient un rôle important dans les processus de recherche des cibles prospectives.

Burgess et al. (2003) ont avancé qu'il est possible que, une fois les instructions sur la tâche de mémoire prospective données aux participants, ceux-ci voient la tâche concurrente comme étant relativement moins importante, ce qui dans ce cas peut augmenter la rapidité avec laquelle les tâches sont réalisées. En plus de questionner les participants sur l'importance qu'avait pour eux la tâche concurrente, une autre analyse intéressante aurait été de voir si les participants ayant un TCC fonctionnent de la même manière lorsqu'il s'agit de départager les processus d'attention sur deux tâches (prospective et concurrente). Il est en effet reconnu que les capacités de traitement de l'information et de l'attention sont perturbées après un traumatisme craniocérébral. À cet effet, la qualité de la recherche des cibles dans l'environnement, la fréquence de vérification, la qualité d'engagement dans la tâche concurrente sont toutes des variables qui auraient contribué à la compréhension du fonctionnement des personnes du groupe

expérimental lors de la réalisation des tâches de mémoire prospective. Dans la lignée de ces réflexions, Knight, Titov et Crawford (2006) ont rapporté que les participants ayant un TCC, en les comparant au groupe témoin, performaient moins bien aux tâches prospectives ainsi qu'à la tâche concurrente lorsqu'ils étaient en immersion dans le *Virtual Street* de Titov et Knight (2005).

Par ailleurs, Maujean, Schum et McQueen (2003) ont démontré que la complexité de la tâche concurrente peut avoir des effets sur la performance en mémoire prospective. À cet effet, ils ont observé que les participants ayant un TCC performaient moins bien que les participants témoins lorsque les demandes cognitives de la tâche concurrente étaient plus élevées. Les participants ayant un TCC étaient, par ailleurs, meilleurs en mémoire prospective, par rapport à eux-mêmes, lorsque la tâche concurrente était plus facile. Ces résultats contrastent cependant avec ceux obtenus par Raskin, Buckheit et Waxman (2012) qui ont indiqué que des personnes ayant un TCC performaient significativement moins bien dans les deux cas, que la tâche concurrente soit facile ou difficile. En somme, une analyse de la performance à la tâche concurrente aurait apporté une contribution intéressante au développement de la connaissance dans le domaine de la mémoire prospective.

Guynn (1999) a mentionné que le monitorage est une caractéristique essentielle de la mémoire prospective. Il est reconnu que cette alternance de l'attention entre la recherche des cibles dans l'environnement et la réalisation de la tâche concurrente

implique la participation du système attentionnel de supervision (*Supervisory Attention System [SAS]*) (Bisiacchi, 1996; Ellis, 1996; Guynn, 1999; McDaniel & Einstein, 2007). Ce système serait impliqué dans les activités non routinières telles que celles proposées dans le protocole immersif de la présente recherche. L'idée principale soutenant le système de supervision est basée sur le principe que les capacités d'attention sont limitées (Kerns & Mateer, 1996; Shallice, 1988). Ainsi, lorsque les activités accomplies sont bien apprises et routinières, elles peuvent être réalisées de manière relativement automatique grâce au gestionnaire de priorités de déroulement (*Contention Scheduling*). Toutefois, dans le contexte de la réalisation différée d'une intention, ce processus n'est pas suffisant. C'est dans ce cas, entre autres, que le SAS entre en jeu. D'abord, parce que plusieurs tâches sont en compétition, il est responsable d'assurer le monitorage de l'environnement à la recherche des cibles prospectives (ce qui s'apparente à la théorie du *Retrival mode + Target checking* de Guinn, 2008). Ce sont donc les cibles prospectives, correctement identifiées par la personne, qui seraient responsables du déclenchement de l'action. En somme, le SAS opère en activant ou en inhibant certains comportements afin de permettre la réalisation des nouvelles actions telles que planifiées initialement.

Pour compléter cette section, les prochains paragraphes porteront sur les résultats obtenus aux analyses de comparaison de moyennes (pour les tâches fonctionnelles et virtuelles) de même que sur l'analyse de régression logistique. Rappelons ici que la performance des personnes ayant un TCC avait été comparée à celle des participants témoins sans antécédents neurologiques avant de faire l'analyse de régression logistique.

Cette comparaison n'avait pas démontré de différence de groupe sur le score global formé de la somme des deux items de l'évaluation fonctionnelle. Ces résultats convergent avec ceux obtenus par Kinsella et al. (1996) qui avaient utilisé une procédure similaire concernant le choix des items. Les auteurs ont démontré une différence entre les personnes qui avaient un TCC et celles du groupe témoin seulement sur l'un des deux items utilisés. Globalement, la performance « normale » des participants ayant un TCC (c.-à-d. ceux qui ont participé à l'étude présentée dans cette thèse) aux tâches fonctionnelles pourrait s'expliquer par le fait que les troubles cognitifs ne sont pas apparents en raison du contexte d'évaluation : milieu structuré et silencieux (Sbordone, 2000). Toutefois, d'autres considérations plus pragmatiques s'imposent à la réflexion. Notamment, la sensibilité de ces items n'a pas été démontrée, comme il sera possible de le voir ultérieurement, lors de l'analyse de régression logistique. Ainsi, le nombre restreint d'items et leur difficulté à couvrir de manière exhaustive le domaine de la mémoire prospective (donc leur faible validité de contenu) pourraient expliquer les résultats obtenus. À cet effet, certains auteurs ont rapporté que les difficultés de mémoire prospective chez les personnes ayant un TCC sont souvent plus prononcées lorsque les processus de rappel sont autogénérés (Carlesimo, Casadio, & Caltagirone, 2004), lorsque la charge cognitive de la tâche concurrente est grande (Maujean, Shum, & McQueen, 2003) ou lorsque des distracteurs sont présents pendant la réalisation de la tâche (Knight et al., 2006). Ici, ce serait donc la complexité des items fonctionnels qui serait remise en question de même que leur validité au plan du contenu.

Par ailleurs, il a été possible de voir que les personnes qui ont un TCC performent moins bien aux tâches réalisées en réalité virtuelle que les participants du groupe témoin lorsque le score global est considéré. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par Kinsella, Ong et Tucker (2009) qui ont utilisé le *Virtual Shopping Trip Task* pour établir leurs comparaisons. À cet effet, ils ont démontré que les personnes ayant un TCC sont moins précises dans le rappel des tâches prospectives que les participants témoins. Ces déficits en mémoire prospective seraient principalement imputables aux lésions des lobes frontaux, fréquentes chez la clientèle ayant un TCC (Kliegel, Eschen, & Thöne-Otto, 2004). Dans cette lignée, Shallice (1988) a rapporté que les personnes ayant des lésions frontales voient souvent leur SAS court-circuité. Dans ces cas, elles peuvent manifester deux types de comportements : soit de la rigidité cognitive, soit de l'inattention ou un attrait pour les stimuli saillants. Ceci pourrait également expliquer que les personnes ayant un TCC qui ont participé à la seconde étude de cette thèse aient été plus lentes que les participants témoins, en raison d'une certaine inefficience du SAS ou d'une surcharge cognitive ressentie pendant la réalisation du protocole utilisant la réalité virtuelle.

Ainsi, il ne faut pas exclure la possibilité que l'alternance de l'attention entre la tâche concurrente et les tâches expérimentales (*fish*, *lease* et *belonging*) ait pu provoquer un ralentissement au plan du traitement des informations et ce, même si la tâche concurrente apparaît comme étant peu mobilisatrice. Cette hypothèse de surcharge cognitive serait, par ailleurs, cohérente avec le PAM *model* de Smith et Bayen (2004)

présenté en introduction. Selon ce modèle, les ressources attentionnelles individuelles sont limitées lors de la participation à une tâche de mémoire prospective. En d'autres mots, lorsqu'une personne concentre son attention sur la tâche concurrente, elle possède moins de ressources pour être attentive à la tâche prospective et vice versa. Or, supposant que le TCC ait un impact sur l'efficience cognitive des participants, il serait logique de penser que le processus d'alternance entre le monitorage des cibles prospectives et la tâche concurrente a des effets sur le plan de la vitesse de traitement de l'information. Cette hypothèse demeure cependant à être démontrée empiriquement.

Dans l'étude de Knight et al. (2006), il a également été observé que les personnes ayant un TCC sont plus sensibles aux interférences et aux distractions que les participants témoins. La présence d'interférences est un facteur important dans le contexte d'une évaluation à saveur écologique car elles contribuent à la représentativité du quotidien. Dans l'environnement virtuel utilisé dans cette thèse, quelques distracteurs sont présents tels que présentés dans le tableau 4 (voir les indices non focaux). Cependant, l'environnement ne contient pas d'interférence en soi. L'ajout de multiples distracteurs et interférences, créant potentiellement une surcharge cognitive dans le protocole d'évaluation, pourrait donc être une avenue intéressante pour bonifier l'évaluation de la mémoire prospective en réalité virtuelle. Bref, compte tenu de ce qui précède, il semblerait non seulement que le protocole d'évaluation gagnerait en sensibilité si la tâche concurrente était complexifiée, mais aussi il verrait son réalisme augmenté en présence de distractions et d'interférences; ceci se

rapprocherait d'ailleurs considérablement plus des concepts de mémoire prospective et de multitasking.

En ce qui concerne le pouvoir discriminant du protocole d'évaluation (incluant les items provenant de la réalité virtuelle et ceux issus de l'évaluation fonctionnelle), les analyses statistiques ont démontré que ce « nouvel » outil d'évaluation est capable de discriminer 74 % des participants selon leur groupe d'appartenance. Malgré les résultats décevants obtenus lors de la première recherche, ces nouvelles données laissent croire que le protocole d'évaluation possède une utilité clinique intéressante dans la classification des individus selon qu'ils aient ou non une problématique neurologique. Le protocole d'évaluation présenté ici semble avoir un pouvoir discriminant supérieur lorsqu'il est comparé au protocole utilisé par Sweeney et al., (2010), lequel a obtenu un taux de classement de 53 % seulement. Selon les auteurs, cette faible sensibilité de l'environnement virtuel pourrait être due au fait que tous les participants ayant un TCC n'avaient pas de problème de mémoire prospective dans le quotidien ou que la tâche utilisée n'était pas suffisamment sensible en ce qui concerne le type de problèmes présentés par les participants. À la lumière de ces conclusions, afin d'améliorer la sensibilité et la spécificité de l'outil décrit dans la présente recherche, un travail sur les tâches apparaît comme étant nécessaire, tel que mentionné précédemment. De plus, l'administration du *Dysexecutive Questionnaire* (DEX) de même que du *Prospective and Retrospective Memory Questionnaire* (PRMQ) à un proche permettrait de mieux sélectionner les participants à inclure dans la recherche selon le niveau de gravité des troubles de mémoire prospective observés dans le quotidien.

Par ailleurs, il est aussi intéressant de constater, en regard de l'équation qui a émergé de l'analyse de régression logistique, que deux éléments tirés de la réalité virtuelle permettent une discrimination fiable des participants. D'une part, le score global, composé de la somme des items provenant de la réalité virtuelle, s'est révélé comme étant une composante importante de l'équation de discrimination. L'examen des changements dans les chances de succès ($\text{Exp}[B]$) révèle que, tout en gardant constantes les autres variables, pour un changement d'une unité dans le score global obtenu en réalité virtuelle, les chances d'être classé dans le groupe témoin augmentent de 0,75. D'autre part, il s'est également avéré juste que la lenteur dans la réalisation de la tâche était une caractéristique propre aux personnes ayant un TCC. L'examen de l'indice $\text{Exp}(B)$ indique que pour un changement d'une unité dans le temps de réalisation, les chances d'être classé comme appartenant au groupe témoin augmentent de 1,14. En synthèse, plus un participant réussit les tâches en réalité virtuelle rapidement, plus il a de chances d'appartenir au groupe témoin, donc d'être identifié comme n'ayant pas de TCC. À l'inverse, un participant qui performe lentement aux tâches présentées en réalité virtuelle sera davantage susceptible d'être classé dans le groupe ayant un TCC. Bref, ces indices ressortent comme étant de bons indicateurs de classification des individus selon le groupe.

Le tableau 5 présente le taux de classement par groupe, ce qui renvoie à la sensibilité et à la spécificité de l'outil de mesure.

Tableau 5
Taux de classement du protocole d'évaluation

	Observations	Prévisions			
		Groupe	Témoins	TCC	Pourcentage correct
Étape 1	Groupe	Témoins	25	6	80,6
		TCC	10	21	67,7
		Pourcentage global			74,2

À l'examen du tableau de classement (tableau 5), il est possible de voir que le protocole d'évaluation est plus sensible¹ pour classifier les participants témoins que les participants ayant un TCC selon le groupe d'appartenance. L'analyse de ce tableau permet aussi de constater que le protocole d'évaluation est plus spécifique² pour les participants témoins que pour les participants ayant un TCC.

Dix individus ayant des lésions neurologiques ont performé comme des participants témoins malgré le fait qu'ils aient un TCC modéré ou grave. Le fait que le protocole manque de sensibilité dans le dépistage des troubles cognitifs post-traumatiques renforce l'idée qu'il est nécessaire de le complexifier tel que discuté dans les paragraphes précédents. D'un autre côté, six participants témoins ont été classifiés comme ayant un TCC. Cette observation suggère l'hypothèse que le manque de spécificité du protocole puisse être attribuable à des variables qui n'ont pas suffisamment été contrôlées dans cette recherche. Par exemple, l'anxiété de performance du participant, son aisance (ou

¹ La sensibilité renvoie à la capacité d'un test de donner un résultat positif en présence de la condition.

² La spécificité d'un test réfère à sa capacité de donner un résultat négatif lorsque la condition est absente.

non) avec la technologie, un subtil déficit d'attention, etc., pourraient peut-être expliquer ce phénomène. Une analyse plus attentive de la performance des participants témoins a révélé que ce taux de faux positifs dans le classement pouvait être associé à l'indicateur temps. En effet, ces participants ont présenté un temps de réalisation comparable aux personnes ayant un TCC. Une interprétation plausible serait qu'il leur était plus difficile de s'orienter dans l'environnement virtuel. Une autre hypothèse serait que le fait de vouloir bien faire les tâches les a conduits à obtenir un temps de réalisation plus long. Ainsi, l'analyse faite antérieurement à propos de l'utilisation de l'indice de temps en tant qu'indicateur de traitement de l'information doit absolument être nuancée. Cela fait également réfléchir sur la pertinence d'utiliser un indicateur sensible pouvant donner des indices sur l'efficience versus l'inefficience cognitive en cours de réalisation des tâches concurrentes et prospectives. En résumé, ces analyses et ces hypothèses explicatives des résultats obtenus laissent entrevoir l'importance de poursuivre les travaux de développement et de recherche portant sur ce protocole d'évaluation en réalité virtuelle afin d'obtenir des informations plus justes sur les qualités qu'il mesure.

Les paragraphes précédents avaient comme principal objectif de discuter des résultats obtenus au cours des deux études réalisées dans le cadre de cette thèse. Il a été possible de mettre en lumière les forces comme les faiblesses du protocole d'évaluation utilisé selon une approche psychométrique. Au terme de ces réflexions, il semble toujours que la réalité virtuelle permettrait d'avoir accès à des « dimensions cognitives différentes », par comparaison aux épreuves fonctionnelles, permettant ainsi d'observer

les déficits tels qu'ils surviennent dans le quotidien. Dans cette optique, la suite de la discussion portera sur l'évaluation neuropsychologique du « fonctionnement quotidien » ainsi que sur le potentiel écologique de la réalité virtuelle.

L'évaluation neuropsychologique du fonctionnement quotidien

La neuropsychologie clinique a été développée dans le but d'identifier les patrons de comportements qui sont associés à des lésions cérébrales. Initialement, le motif de l'évaluation visait à localiser les lésions et à en déterminer les étiologies possibles (Franzen et Wilhelm, 1996; Lillie et al., 2010). En plus de statuer sur la présence, la localisation et l'étendue du dommage cérébral, le neuropsychologue devait décrire les conséquences fonctionnelles des lésions par l'établissement d'une relation entre les aires cérébrales atteintes et les comportements observés. Avec la venue des outils diagnostiques de neuroimagerie (p. ex. : *Ct-Scan*, *MRI*, *PET-Scan*, *fMRI*, etc.), le focus de l'évaluation neuropsychologique a changé (Franzen & Wilhelm, 1996; Spooner & Pachana, 2006), ce qui apporte nécessairement une transformation dans la pratique clinique (Long, 1996). Plus spécifiquement, ces changements influencent nécessairement la portée de l'interprétation des données issues des tests de même que les recommandations qui en découlent. Ainsi, il semble que les examens neuroradiologiques aient pris la place de l'évaluation neuropsychologique dans le contexte de l'obtention d'un diagnostic initial. Toutefois, ces outils médicaux ne fournissent pas d'information pertinente sur les conséquences fonctionnelles du dommage cérébral (Long, 1996). De plus, l'évaluation neuropsychologique demeure toujours pertinente dans le diagnostic de

certaines conditions telles que le dépistage précoce de la maladie d'Alzheimer (Derrer, Howieson, Mueller, Camicioli, Sexton, & Kaye, 2001) de même que dans toutes les conditions où les dommages sont diffus, donc difficiles à localiser par la neuroimagerie.

Le champ de pratique de la neuropsychologie exige toujours l'établissement des relations existant entre le cerveau, les lésions cérébrales et les comportements. Or, les changements dans la pratique, qui ont été abordés dans le précédent paragraphe, concernent surtout l'utilité et la portée des résultats obtenus de l'évaluation. En effet, l'intérêt se porte de plus en plus sur l'étude des fonctions cognitives impliquées dans la réalisation de tâches quotidiennes de même que sur le caractère prédictif de l'évaluation neuropsychologique en lien avec la réalité de la personne. C'est pourquoi le neuropsychologue doit maintenant donner son opinion sur un traitement à offrir à la personne, sur son potentiel de réadaptation et sur sa capacité à vivre de manière autonome, sans danger pour soi et les autres (Spooner & Pachana, 2006). Bref, le neuropsychologue doit élaborer des prédictions en regard des capacités fonctionnelles de la personne, soit celles de réaliser avec succès les tâches relatives à ses habitudes de vie.

Les changements sur le plan du motif de référence, tels que décrits précédemment, entraînent forcément de nouveaux besoins concernant les outils d'évaluation neuropsychologique. Dans cette optique, la principale limite des tests traditionnels réside dans le faible niveau de représentativité de la tâche et du contexte d'évaluation par rapport au milieu réel (Sbordone, 1996). Ceci limite les prédictions en lien avec le

quotidien et ce, même si l'utilisation du test s'inscrit dans le courant de la véridicalité¹ de la validité écologique. En effet, Spooner et Pachana (2006) ont rapporté qu'il est parfois difficile d'établir un parallèle fiable entre les données issues d'un test traditionnel et la performance telle qu'elle est effectuée dans le quotidien. Ainsi, la nécessité de développer et d'utiliser des tests écologiquement valides, selon l'angle de la vérisimilitude, augmente avec le désir de tracer un portrait précis des capacités d'une personne en lien avec son quotidien (Lillie, Kowalski, Patry, Sira, Tuokko et Mateer, 2010). Toutefois, la prédiction d'un comportement, tel qu'il se traduit dans le quotidien, n'est pas facile à réaliser car : a) il y a peu d'informations au sujet de la relation qui existe entre les résultats d'un test et le comportement tel que reproduit dans la réalité et b) il est clair que cette corrélation est modulée par d'autres variables inhérentes au fonctionnement quotidien (Franzen & Wilhem, 1996) telles que les interférences, la motivation, la possibilité d'utiliser des moyens de compensation, etc.

La définition d'une « neuropsychologie du quotidien » entraîne une réflexion incontournable sur les construits théoriques des tests utilisés de même que sur leur valeur psychométrique. Quelques concepts fondamentaux émergent des écrits scientifiques dans le but de cerner les besoins en matière de prédiction des comportements tels que reproduits dans le quotidien. Il semble que l'élaboration d'un outil de mesure valide et fiable doit inclure et définir ces concepts : a) fonctionnement

¹ En fait, un test qui possède une bonne véridicalité a fait l'objet empirique de sa validité prédictive au sens des catégories « classiques » utilisées en psychométrie. Autrement dit, un test s'inscrit dans la véridicalité s'il peut prédire le fonctionnement d'une personne au travail, à l'école, etc. (Spooner & Pachana, 2006)

quotidien (*everyday functioning*); b) habiletés fonctionnelles (*functional skills*); c) activité de la vie quotidienne (*daily life*); d) tâches « naturelles » (*naturalistic tasks*); e) vie réelle ou vraie vie (*real life*) et f) environnement ouvert (*open environment*). Ainsi, une évaluation neuropsychologique écologique, selon cette perspective, doit exposer une personne à des tâches naturelles, reproduisant la vie de tous les jours, dans le but d'obtenir des observations sur son fonctionnement cognitif et psychologique tel que reproduit dans le quotidien. Ceci impose donc, au plan de la validité de contenu, que le test soit écologiquement valide, donc représentatif du quotidien. Ici, la vérisimilitude semble tout indiquée. Celle-ci partage assurément des « affinités » avec le principe de validité apparente (*face value*) utilisé dans un processus « classique » de validation de contenu en psychométrie.

Selon Chaytor et Schmitter-Edgecombe (2003), il y a plusieurs évidences qui confirment la supériorité d'une approche de vérisimilitude par rapport à la véridicalité en ce qui concerne la prédiction du fonctionnement cognitif dans le quotidien. En effet, ces auteurs ont observé que les résultats des tests construits selon un paradigme de vérisimilitude sont plus fortement corrélés à la performance cognitive quotidienne que les tests traditionnels, même si ces derniers sont appliqués sous l'angle de la véridicalité. Il serait donc tentant de dire que la vérisimilitude a un plus grand potentiel de couvrir la complexité des comportements tels qu'ils sont reproduits dans le quotidien par rapport à la véridicalité, qui cible des construits restreints en raison du rationnel de construction des tests. Par contre, il est important de dire qu'il semble difficile d'accéder à une

vérisimilitude « parfaite ». En effet, il sera toujours difficile de reproduire fidèlement un environnement de telle sorte qu'un comportement d'intérêt prendra place à l'intérieur de celui-ci exactement comme dans la vraie vie (Marcotte, Scott, Kamat, & Heaton 2010). Il faut également dire qu'un test élaboré selon le concept de vérisimilitude n'est pas nécessairement écologiquement valide (Chaytor & Schmitter-Edgecombe, 2003). En effet, il semble que plusieurs tests existants doivent être validés en ce qui a trait à leur lien avec la vie quotidienne (Rabin, Burton, & Barr, 2007). C'est notamment le cas de plusieurs protocoles utilisant la réalité virtuelle. À titre d'exemple, Farley, Higginson, Shernab et MacDougall (2011) ont développé le *Clinical Test of Visuospatial Function* dans le but d'évaluer les personnes âgées qui vivent dans la communauté. Les auteurs, qui présentent l'outil comme étant basé sur l'approche écologique de vérisimilitude, n'ont pas réussi à démontrer qu'il était un meilleur prédicteur que les tests traditionnels ni qu'il ciblait mieux les comportements quotidiens.

Ces réflexions sur la nécessité de développer des outils d'évaluation écologiquement valides amènent l'idée que, contrairement aux tests neuropsychologiques traditionnels ou aux épreuves réalisées en laboratoire, le fonctionnement de tous les jours est difficile à standardiser. Plusieurs facteurs peuvent interférer avec la performance d'une personne lorsqu'elle réalise une tâche dans son quotidien, d'où la difficulté de déterminer des paramètres fixes dans un contexte d'évaluation. Parmi ceux-ci, Marcotte et al. (2010) ont énuméré des facteurs personnels tels que les troubles mentaux se surajoutant à la condition neurologique, les expériences

antérieures de la personne, une approche personnelle dans la résolution de problèmes, la motivation, les problèmes physiques post-traumatiques, l'éducation, etc. Ils ont également répertorié des facteurs liés à l'évaluation neuropsychologique ainsi qu'au contexte d'évaluation. Ces facteurs sont décrits plus bas, dans le but de réaliser une « analyse théorique » des aspects écologiques que possède le protocole d'évaluation utilisant la réalité virtuelle présenté dans cette thèse.

Environnement d'évaluation. Selon Marcotte et al. (2010), l'environnement d'évaluation en soi est le premier élément à cibler car il rend difficile la représentativité d'un test dans une perspective de vérisimilitude. Plus spécifiquement, un test écologique selon cette approche devrait reproduire les interférences et les distracteurs de manière fidèle à ce qui survient dans le quotidien. La tâche ou l'environnement simulé devrait également intégrer des tâches complexes, suffisamment longues, de type *multitasking*.

L'environnement virtuel utilisé dans cet ouvrage limite le potentiel de vérisimilitude de l'outil d'évaluation. Trois principales raisons permettent de soutenir cette affirmation : d'abord, tel que mentionné précédemment, l'environnement virtuel ne contient pas suffisamment de distracteurs et d'interférences. Cependant, il faut noter que lorsqu'une personne visite un appartement laissé libre par l'occupant, il est attendu d'avoir un niveau minimum de perturbations, l'environnement restant somme toute relativement silencieux. Ensuite, la tâche concurrente n'était pas suffisamment complexe pour présenter une condition de *multitasking* exigeant plusieurs ressources cognitives.

Enfin, le temps d'immersion était plutôt court, ce qui peut nuire, en fin de compte, à la représentativité de l'environnement virtuel par rapport à la réalité du quotidien.

Spécificité des tests. Le deuxième facteur pouvant nuire à l'aspect écologique d'une tâche est la spécificité des tests neuropsychologiques, qui ne permet pas toujours de couvrir l'étendue des phénomènes qui se produisent dans le quotidien. La problématique vient principalement du fait que la plupart des tests utilisés ciblent des construits cognitifs spécifiques, ce qui crée une difficulté à identifier l'ensemble des fonctions qui sont requises dans le fonctionnement de la vie réelle. Selon Spooner et Pachana (2006), ceci ne permet pas d'obtenir des informations sur le degré de difficulté qui peut être expérimenté dans le quotidien. Pour Tannock, Ahles, Ganz et van Dam (2004), il est impératif que l'outil d'évaluation donne accès directement aux problèmes que les déficits cognitifs engendrent dans la vie quotidienne. Ce dernier point amène la nécessité de discuter des déterminants cognitifs multiples qui contribuent à la réalisation d'une tâche dans le quotidien (Marcotte et al., 2010). En effet, force est de constater que plusieurs tâches quotidiennes impliquent de multiples processus et fonctions cognitives qui sont elles-mêmes en interaction. L'élaboration d'un outil d'évaluation écologique devrait nécessairement identifier les fonctions cognitives qui sont impliquées dans la réalisation d'une tâche quotidienne afin d'en faire une observation juste. Bref, il faut retenir de ce point que les évaluations neuropsychologiques ciblent généralement un échantillon de comportements limités (Marcotte et al., 2010). Selon Chaytor et Schmitter-Edgecombe (2003), ceci ne fournit pas un portrait complet du fonctionnement d'une personne. Les

auteurs ont souligné que les tâches quotidiennes qui s'étalement sur de plus longues périodes de temps sont plus propices à faire ressortir la variabilité au plan de la performance.

Le protocole immersif utilisé dans cette thèse est basé sur un construit qui prévoit l'interaction de plusieurs fonctions cognitives entre elles. Plus spécifiquement, l'environnement virtuel et la tâche qui y est intégrée donnent la possibilité d'observer des phénomènes complexes en lien avec le monitorage, le partage de l'attention, les processus de vérification des cibles prospectives, la capacité de réaliser un plan d'action, etc. Toutefois, la principale faiblesse du protocole réside dans le fait que des mesures de ces phénomènes n'ont pas été élaborées. Au final, l'instrument donne peu d'informations compatibles avec les concepts abordés précédemment concernant l'évaluation neuropsychologique du quotidien. En fait, la seule information disponible porte plus sur le résultat (c'est-à-dire la réussite ou non d'une tâche) que sur les processus impliqués dans la réalisation de la tâche.

Facteurs environnementaux et ressources. Les facteurs environnementaux et les ressources disponibles pour soutenir la performance de la personne devraient également être pris en compte dans la construction d'une tâche basée sur une approche de vérisimilitude. Ainsi, selon Marcotte et al. (2010), la capacité à réaliser des tâches dans le quotidien peut facilement être influencée par des interactions de type « personne-environnement », notamment par l'utilisation de stratégies de compensation.

Évidemment, celles-ci soutiennent la performance d'une personne dans le quotidien et elles devraient être prises en considération dans le cadre de l'évaluation neuropsychologique. Par conséquent, il semble que les évaluations peuvent sous-estimer les capacités d'une personne à performer dans un environnement ouvert, c'est-à-dire dans lequel elle est complètement libre d'utiliser tous les outils nécessaires et disponibles pour soutenir sa performance (Franzen & Wilhelm, 1996).

L'environnement virtuel utilisé dans les études soutenant cette thèse est très minimalement interactif. Il offre peu à la personne en termes de possibilités de réajustement, d'initiative et de créativité. De plus, il n'offre pas non plus la possibilité d'intégrer l'utilisation de moyens compensatoires, ce qui effectivement ne permet pas d'avoir un portrait juste de la réalité de la personne, surtout si elle utilise généralement de tels moyens.

De leur côté, Franzen et Wilhelm (1996) ont proposé une autre méthode d'évaluation de la validité écologique d'un test neuropsychologique. Dans le cas de la vérisimilitude, il est selon eux important d'examiner l'instrument de mesure sur la base de considérations théoriques. Il serait donc essentiel d'établir la relation théorique qui existe entre les demandes de la tâche et les demandes de la situation reproduite dans le quotidien. La première étape proposée par les auteurs consiste à déterminer si la tâche présente une similitude topographique en lien avec le domaine des comportements à observer. Une réponse par l'affirmative serait appropriée ici concernant la tâche réalisée

en réalité virtuelle. En effet, la tâche s'apparente au construit théorique de la mémoire prospective; de plus, l'environnement virtuel est représentatif d'un appartement réel. Sur la base de ces deux constats, il serait possible de dire que la tâche de mémoire prospective demeure dans le champ de la vérisimilitude.

En deuxième lieu, Franzen et Wilhelm (1996) ont aussi proposé d'examiner l'outil de mesure en référence avec la description de la situation qui est sous étude. Plus spécifiquement, ils suggèrent de se demander si les habiletés couvertes dans la tâche sont compatibles avec les exigences d'une situation similaire dans un environnement réel. Ainsi, il convient d'examiner les fonctions nécessaires à la réalisation de la tâche telle que les capacités de traitement de l'information, le degré d'interférences ou de distractions présent dans la situation du quotidien, la possibilité d'utiliser des moyens de compensation de manière compatible avec une tâche de tous les jours. Cette étape de validation de contenu regroupe la plupart des critères énumérés précédemment par Marcotte et al. (2010). C'est à cette étape de l'analyse que l'environnement virtuel et la tâche qui y est intégrée perdent un peu de leur valeur par rapport à la vérisimilitude.

Cette première sous-section portant sur la neuropsychologie du fonctionnement quotidien avait comme principal objectif de déterminer à quel point le protocole immersif présenté dans cette thèse pouvait se définir par l'approche de vérisimilitude de la validité écologique. À la lumière des analyses réalisées dans les précédents paragraphes, force est de constater que l'environnement virtuel, bien que calqué sur une

tâche plausible dans le quotidien, possède un faible niveau de vérisimilitude selon les critères de Marcotte et al. (2010). Ses principales faiblesses concernent les niveaux de distraction et d'interférence présents dans l'environnement, la durée de la tâche, la possibilité d'avoir de multiples mesures du fonctionnement cognitif, l'interactivité avec l'environnement de même que la possibilité d'utiliser des moyens de compensation. En conclusion, bien que des améliorations puissent être apportées à la tâche et à l'environnement virtuel afin d'en améliorer sa représentativité par rapport au quotidien, le protocole immersif demeure, selon l'auteur de la thèse, quand même ancré dans la vérisimilitude. Enfin, la prochaine sous-section portera sur le potentiel écologique de la réalité virtuelle.

Le potentiel écologique de la réalité virtuelle

Potvin et al. (2011) ont mentionné que peu de tests valides et écologiques existent pour dépister les déficits de mémoire prospective tels qu'ils se manifestent dans le quotidien. La réalité virtuelle apparaît souvent comme étant un moyen attrayant de contourner ces lacunes. Selon Titov et Knight (2005) de même que Spooner et Pachana (2006), la réalité virtuelle – qui incorpore selon ces derniers auteurs les principes de vérisimilitude – serait un moyen écologiquement valide d'évaluation des fonctions cognitives. Dans le même ordre d'idées, Marcotte et Grant (2010) ont mentionné que les nouvelles technologies, telle la réalité virtuelle, deviennent des moyens intéressants d'étudier les comportements d'une manière « semi-naturelle » (*seminaturalistic*). Toutefois, il est nécessaire de mentionner que, selon eux, « virtuel » n'est pas synonyme

« d'écologiquement valide ». C'est pourquoi ces outils d'évaluation, au même titre que les tests traditionnels, doivent être soumis à des études psychométriques rigoureuses en ce qui concerne les paramètres de validité et de fidélité.

Le principal avantage qu'offre la réalité virtuelle est la possibilité d'administrer une mesure standardisée dans un environnement calqué sur la réalité. Par contre, la question qui s'impose actuellement consiste à se demander si la réalité virtuelle offre réellement la possibilité d'obtenir une mesure qui soit écologique, comme le soulavaient Marcotte et Grant (2010). Évidemment, les environnements virtuels offrent l'opportunité de présenter un contexte d'immersion s'apparentant au quotidien, d'autant plus que les interfaces graphiques augmentent en qualité avec les années, améliorant ainsi le réalisme. Cherner (2010) a mentionné que pour déterminer la validité écologique des items d'un outil d'évaluation, il est important d'établir le degré avec lequel le participant est familier avec le type de tâche qui fait l'objet de l'évaluation. En ce sens, dans le cas du protocole d'évaluation immersif en réalité virtuelle de la présente étude, deux problèmes se posent. Le premier consiste à déterminer le niveau de familiarité des tâches virtuelles (visite de nouveaux appartements, mise en situation simulant la visite de logements et un déménagement hypothétique, réalisation spécifique d'intentions : *fan*, *lease* et *fish*). Le second problème a pour nature la détermination du niveau de familiarisation et d'aisance avec la technologique utilisée.

Il est vrai que l'immersion en réalité virtuelle présente plusieurs contraintes inhérentes à la technologie soit, entre autres, l'utilisation du visiocasque et de la souris. Ces éléments pourraient, il ne fait aucun doute, provoquer un bris dans la validité écologique de la tâche dû au fait que la personne soit plus ou moins familière avec les équipements. Par conséquent, ceci pourrait, en plus de briser le réalisme recherché, interférer avec les tâches proposées par la réalité virtuelle. Plus spécifiquement, le visiocasque utilisé (eMagin z800) possède un angle de vision diagonale de 40 degrés, ce qui ne permet pas un haut niveau d'immersion. En effet, il est possible que certains stimuli soient difficiles à distinguer ou que certains objets virtuels attirent davantage l'attention du participant. L'utilisation de la souris, servant à la préhension d'objets de même qu'à se déplacer, pourrait aussi réduire la validité écologique de l'étude, car à son tour, elle brise le naturel de la tâche. Par contre, à titre d'exemple, cuisiner avec une souris demande certainement les mêmes capacités cognitives que de cuisiner dans la vie réelle. En ce sens, si la personne reste concentrée sur l'action et que celle-ci est réalisée avec des paramètres similaires à ceux du quotidien, alors il semble légitime de parler de situation écologique. Quoi qu'il en soit, dans un avenir proche, il deviendra important d'élaborer des recherches portant spécifiquement sur la validité écologique des environnements virtuels. Une méthode efficace consisterait à comparer une tâche réalisée en réalité virtuelle avec la même tâche réalisée dans le quotidien. Il serait ainsi plus aisément de parler de validité écologique sous l'angle de la vérisimilitude.

Un autre facteur à considérer, à première vue propre à la réalité virtuelle et à l'utilisation de médias électroniques, concerne le sentiment de présence. Ce concept est défini par le sentiment d'être « réellement là », dans l'environnement (Sadowski & Stanney, 2002). En effet, il serait logique de penser que le sentiment de présence est un facteur pouvant soutenir les « aspects écologiques » de la tâche, contournant ainsi les limites des appareillages mentionnés dans le paragraphe précédent. Karaseitanidis, Amditis, Patel, Sharples, Bekiaris, Bullinger et Tromp (2006) ont démontré que le sentiment de présence n'était pas limité par le système utilisé, qu'il s'agisse d'un visiocasque, d'une voûte immersive, d'un projecteur ou simplement d'un écran d'ordinateur. Le sentiment de présence en réalité virtuelle et le facteur d'immersion seraient ainsi des éléments facilitant l'implication de la personne à l'intérieur de l'environnement virtuel.

Toutefois, les résultats obtenus au cours des deux études rapportées dans cette thèse ont démontré que les participants se sentaient moyennement présents. Or, il est logique de se demander jusqu'à quel point ils avaient l'impression d'être partie prenante de l'activité et jusqu'à quel point le sentiment de présence a pu nuire à l'écologie de la tâche. Dans la réalité virtuelle, comme dans la vraie vie, le sentiment de présence pourrait représenter la « pleine conscience » de ce qu'une personne fait dans son environnement, une sorte de connexion au « moment présent ». Par contre, force est de constater que lorsqu'une personne est concentrée sur une tâche cognitive (lire un livre, rédiger un article, chercher à résoudre un problème, etc.), elle est moins présente (ou

consciente) à ce qui l'entoure. Dans ce contexte, il est possible de suggérer que le sentiment de présence à l'environnement physique ou virtuel diminuerait proportionnellement à l'importance du niveau de traitement cognitif requis par la tâche à réaliser.

En psychologie, le sentiment de présence est un concept riche et fondamental, principalement lorsque la tâche consiste en un traitement de l'anxiété par l'exposition (Bouchard, Côté, & Richard, 2007). Le rôle du sentiment de présence dans ce contexte serait d'activer le réseau neuronal associé à la peur (Rothbaum et al., 1996). Plus spécifiquement, il semblerait que l'anxiété et le sentiment de présence soient significativement corrélés et que ce dernier soit plus intense chez les personnes vivant de l'anxiété (Robillard, Bouchard, Fournier, & Renaud, 2003). De manière générale, Robillard et al. (2003) ont amené l'idée que le sentiment de présence soit toujours associé à un état émotionnel. À ce titre, il serait également important de déterminer la contribution de ce phénomène à la réussite d'une tâche cognitive. Ainsi, sur la base des résultats obtenus dans les deux études de cette thèse, lesquels démontrent que les participants avaient un sentiment de présence plutôt « moyen » lors de l'immersion dans l'environnement virtuel, il serait possible de formuler l'hypothèse selon laquelle ce concept ne soit pas de première importance dans l'évaluation des fonctions cognitives en modalité virtuelle.

Afin d'évaluer cette question de recherche, deux aspects fondamentaux viennent à l'esprit, le premier étant conceptuel et le second méthodologique. Dans un premier temps, selon Côté et Bouchard (2006), « certaines conditions semblent associées au développement du sentiment de présence dont notamment l'implication dans la tâche virtuelle et la propension à l'immersion ». Dans ce contexte, il serait intéressant de savoir si ces deux facteurs, essentiels pour expérimenter le sentiment de présence (Witmer & Singer, 1998), sont influencés par le fait de réaliser une tâche cognitive dans un environnement virtuel dont la conception initiale n'est pas de faire vivre d'emblée une gamme d'émotions. Dans un deuxième temps, il devient également essentiel de s'interroger sur l'utilisation des questionnaires qui évaluent le sentiment de présence. En effet, les items qu'ils contiennent pourraient ne pas permettre une analyse complète du phénomène. En plus de demander au participant « s'il a eu l'impression que le monde virtuel l'entourait » ou « à quel point il était conscient du monde virtuel ou de l'environnement réel », il serait important d'ajouter des items concernant le niveau de concentration et sur l'importance accordée aux tâches demandées. En fait, si le participant est concentré sur la tâche, il devrait être moins présent aux différences qui existent entre ses expériences dans la vraie vie et celles de l'expérience immersive; d'autant plus que, tel que discuté dans les autres sections, le système attentionnel est limité en termes de ressources disponibles.

Dans le même ordre d'idées, les cybermalaises pouvant être vécus pendant l'immersion pourraient également être un facteur affectant à la fois l'écologie de la

mesure et la performance de la personne lors de la réalisation d'une tâche cognitive. Les cybermalaises seraient liés à l'utilisation de la technologie (Kim, Kim, Kim, Ko, & Ko, 2005). Ils s'apparentent aux malaises des transports et peuvent se produire pendant ou après à l'immersion. Ils proviennent d'un conflit sensoriel temporaire : les yeux perçoivent un mouvement qui peut être décalé de quelques millisecondes de ce qui est perçu par le système vestibulaire, alors que le reste du corps ne se déplace presque pas (Stanney, Kennedy, & Kingdon, 2002). Les cybermalaises peuvent également être causés par le port d'équipement (Bouchard et al., 2003) ou être apparentés au syndrome de Sopite (Lawson, Graeber, & Mead, 2002). Ce dernier est un désordre neurologique provoqué par un « malaise des transports » ou *Motion Sickness*. Ce dernier provoque chez la personne des symptômes de fatigue, de la somnolence et des changements d'humeur lors de périodes prolongées de mouvement. Dans les études réalisées lors de cette thèse, les participants n'ont pas vécu de réel malaise physiologique. Il est donc permis de croire que les cybermalaises étaient peu impliqués dans les résultats obtenus. Il est aussi supposé que cette variable n'ait pas contribué à la diminution du potentiel écologique de la réalité virtuelle. Toutefois, ces allégations restent à démontrer empiriquement.

En synthèse, il demeure pertinent de s'interroger sur le caractère écologique de la réalité virtuelle. En effet, l'utilisation de périphériques requis pour communiquer avec l'environnement virtuel, le réalisme des images, la nécessité ou non d'être présent dans l'environnement et la possibilité de vivre des cybermalaises sont autant de facteurs

pouvant limiter la vérisimilitude de la tâche proposée. Par ailleurs, il est important de mentionner que, dans le cadre des recherches réalisées dans cette thèse, il n'a pas été démontré que la réalité virtuelle soit vraiment un moyen écologique d'évaluation des fonctions cognitives et ce, malgré les allégations initiales. Évidemment, la méthodologie employée ne permettait pas ce genre d'analyse d'autant plus que pour le moment, la nature exacte de la mesure demeure à définir. À cet effet, pour Franzen et Wilhelm (1996), la meilleure évidence de validité écologique implique l'examen des relations entre un instrument de mesure et le comportement dans la réalité. Ils suggèrent donc d'établir des corrélations entre les résultats obtenus au test écologique et les données recueillies selon certaines méthodes d'évaluation des comportements qui incluent l'auto-observation, l'observation par des proches dans le milieu de vie et l'utilisation de questionnaires.

Actuellement, il semble encore pertinent de poursuivre les études visant à démontrer le caractère écologique de la réalité virtuelle. À cet effet, McGeorge, Philips, Crawford, Garden, Della Sala et Milne (2001) ont comparé une tâche de commissions multiples réalisée dans un environnement réel à la même tâche réalisée dans l'environnement virtuel. Ils ont démontré que la corrélation entre le nombre de commissions complétées dans l'environnement réel et dans l'environnement virtuel était significative et relativement élevée ($r[10] = 0,79$). Dans le même ordre d'idées, Rand, Rukan, Weiss et Katz (2009b) ont également comparé leur version du *Virtual Multiple Errands Test* (VMET) au *Multiple Errands Test* (MET), réalisé dans un environnement réel, soit un

centre commercial. Ils ont découvert des corrélations modérées à élevées entre le VMET et le MET chez la population de personnes ayant un AVC (*âge moyen* = 64; $n = 9$) : nombre total d'erreurs ($r[9] = 0,70$), erreurs partielles ($r[9] = 0,88$), erreur d'inefficience ($r = 0,73$). Ils ont aussi découvert des corrélations significatives modérées entre les deux outils auprès de la population âgée du premier groupe témoin (*âge moyen* = 64; $n = 20$) : nombre total d'erreurs ($r[20] = 0,66$), erreurs partielles ($r[20] = 0,61$), erreurs d'inefficience ($r[20] = 0,66$). Toutefois, aucune corrélation n'a été trouvée entre les deux outils chez la population de personnes jeunes du deuxième groupe témoin (*âge moyen* = 26; $n = 20$). Enfin, pour l'ensemble de la population ($n = 49$), les auteurs ont trouvé des corrélations modérées à élevées entre les items du VMET et ceux du MET dont : nombre d'erreurs ($r[49] = 0,77$), erreurs partielles ($r[49] = 0,80$), erreurs d'inefficience ($r[49] = 0,72$), utilisation de stratégies ($r[49] = 0,44$). Aucune corrélation cependant n'a été trouvée pour l'item bris de règles. Enfin, ces données indiquent quelques faits intéressants : les personnes âgées comparées aux jeunes adultes tendent à performer de manière différente dans une tâche de *multitasking*; la performance aux tâches proposées par la réalité virtuelle est comparable sur plusieurs points à celle réalisée dans la réalité, ce qui milite en faveur de l'écologie de la mesure.

Au cours de cette discussion, il a été possible de voir que la réalité virtuelle continue d'être attrayante en tant que mesure écologique des fonctions cognitives et ce, malgré les défis technologiques qu'elle présente. Il a également été possible de voir que la performance des participants dans la réalité virtuelle est compatible avec les grands

modèles théoriques existants, ce qui en fait un instrument valide au plan de son contenu. Cependant, considérant la complexité du construit théorique et l'interaction entre les fonctions cognitives nécessaires à la réalisation différée d'une intention, force est de constater que des efforts supplémentaires doivent être déployés afin de s'assurer que l'instrument possède, au plan psychométrique, toutes les propriétés requises : validité, étendue, précision, linéarité, justesse et « interprétabilité » (Laurencelle, 1998). Également, il devient important de mener des travaux qui démontreront réellement la portée écologique des mesures prises dans les environnements virtuels.

Les principales qualités de cette thèse se trouvent dans la mise sur pied d'un protocole original et créatif utilisant la réalité virtuelle à des fins d'évaluation de ce qui s'est peut-être, au final, avéré être davantage une situation de *multitasking* que de mémoire prospective. Il faudra néanmoins d'autres études pour clarifier quels sont les construits cognitifs évalués par ce protocole virtuel. Quoiqu'il en soit, ce protocole d'inspiration écologique a le potentiel de détecter des problématiques cognitives chez les personnes qui ont subi un traumatisme craniocérébral. Plus précisément, le temps pris pour accomplir la tâche pourrait laisser supposer, sous toute réserve, une tendance à la surcharge cognitive ainsi que des difficultés à alterner l'attention de manière flexible lors des activités de monitorage. Cette interprétation demeure cependant à confirmer empiriquement dans une future recherche. Le score global obtenu par l'addition des items extraits de la réalité virtuelle est, selon l'équation de régression logistique, un indicateur fiable de la classification des individus selon leur groupe d'appartenance. Les

deux indices combinés (temps de réalisation et score total en réalité virtuelle) se sont révélés être des items pertinents pour discriminer l'appartenance au groupe selon qu'une personne ait ou non un TCC.

Les principales faiblesses de cette recherche sont en grande partie d'ordre méthodologique et conceptuel. D'une part, il importe de dire que le critère choisi pour étudier le protocole immersif n'était pas adéquat. En effet, tel qu'il a été possible de le voir tout au long de cette discussion, il aurait été préférable d'utiliser soit un outil spécifiquement élaboré pour évaluer la mémoire prospective, soit un ensemble d'outils reconnus pour évaluer des fonctions impliquées dans la mémoire prospective telles que les fonctions exécutives et la mémoire épisodique, soit les deux. Ainsi, une procédure de validation convergente et divergente aurait été plus appropriée qu'un processus de validation par critère. Le faible nombre d'items inclus dans les tâches et la relative courte durée de l'immersion peuvent aussi expliquer les effets de plafonnement remarqués dans la performance des participants sains. À cet effet, Kvavilashvili (1998) a rapporté qu'il est fréquent que la majorité des participants performent selon un niveau « plafond » ou « plancher ». En effet, dans les tâches de type laboratoire, il y aurait une tendance soit à se souvenir de toutes les tâches, soit à oublier complètement l'ensemble des tâches demandées. Des auteurs ont suggéré quelques stratégies pour éviter l'effet plafond dans la performance, mais il ne semble pas clair, selon Kvavilashvili (1998), comment elles atténuent cet effet. Par exemple, il a été suggéré : 1) de ne pas introduire la tâche prospective comme étant la tâche expérimentale primaire ou 2) d'éviter

d'informer le participant que la performance de la mémoire prospective sera étudiée au cours de l'étude (Kvavilashvili, 1992). Pour leur part, Einstein et McDaniel (1990) ont suggéré d'introduire un intervalle d'au moins quinze minutes entre la présentation de la tâche prospective et le début de l'évaluation afin de faire en sorte de produire le plus grand nombre d'oublis possible.

Dans une perspective plus large, le développement futur de protocoles d'évaluation de la mémoire prospective pourrait s'inscrire dans la foulée des études qui cherchent à déterminer si la mémoire prospective peut devenir un critère diagnostique pour les troubles cognitifs légers liés au vieillissement (Blanco-Campa, Coen, Lawlor, Walsh, & Burke, 2009; Costa et al. 2011). Enfin, bien que cette réflexion aille au-delà des résultats de cette thèse, il devient également important que les recherches à venir concernant l'utilisation de la réalité virtuelle fassent la démonstration empirique de son caractère écologique.

Conclusion

La présente thèse a décrit le développement d'un protocole d'évaluation de la mémoire prospective utilisant la réalité virtuelle selon une approche écologique dite de vérisimilitude. Le premier objectif était de déterminer si cet outil, construit à partir des dimensions théoriques connues de la mémoire prospective, était valide sur la base de comparaisons avec une mesure étalon. Le deuxième objectif était de déterminer le pouvoir discriminant du protocole d'évaluation auprès de personnes ayant un traumatisme craniocérébral (TCC) modéré ou grave.

Au terme de la recherche, le premier objectif n'a pas été atteint, principalement en raison de considérations théoriques et de problématiques méthodologiques. Heureusement, le second objectif, quant à lui, a été atteint par le constat que le protocole d'évaluation utilisant la réalité virtuelle peut classifier, dans une bonne proportion, les individus selon le groupe d'appartenance. Les réflexions émergeant des études présentées dans la thèse ont permis de faire plusieurs constats relatifs à la mémoire prospective, l'évaluation écologique et la réalité virtuelle. Plus spécifiquement, la présente conclusion a comme objectif de souligner la complexité du construit de la mémoire prospective de même que les défis d'intégrer à l'évaluation neuropsychologique les concepts liés à la validité écologique. Elle veut également s'interroger sur la pertinence d'utiliser les technologies de l'informatique, notamment la réalité virtuelle, au service de la neuropsychologie. Au terme de cette section, un éclairage sera jeté sur les défis méthodologiques et psychométriques concernant une mesure qui intègre la réalité virtuelle, l'évaluation écologique et le construit théorique de

la mémoire prospective. Enfin, cette section se terminera par des recommandations à suivre pour développer une approche évaluative en neuropsychologie qui soit vraiment représentative du fonctionnement quotidien.

La complexité du construit de la mémoire prospective

Les outils existants pour évaluer la mémoire prospective ne sont pas aussi sophistiqués que pour les autres dimensions de la mémoire. En fait, il apparaît que c'est la complexité de son construit théorique qui rend difficile l'élaboration d'une tâche valide au plan psychométrique. En effet, il semble qu'il y ait plusieurs facteurs à considérer dans la construction de tâches de mémoire prospective. D'abord, sur le plan fonctionnel, il convient de tenir compte du fait que plusieurs fonctions cognitives sont en interaction entre elles : planification, partage de l'attention, monitorage, mémoire épisodique, mémoire de travail, etc. Ensuite, au plan conceptuel, il faut tenir compte également que, dans le contexte de la réalisation différée de l'intention, il est essentiel d'être en *multitasking* car la tâche concurrente et la tâche prospective sont à la fois interreliées et en compétition. Finalement, au plan méthodologique, il importe de tenir compte du fait que la tâche concurrente doit apparaître comme étant prioritaire, que la personne ne doit pas penser que la tâche prospective est l'objet principal de l'étude et qu'un délai entre les consignes et le début des tâches doit être considéré afin d'éviter d'être confronté à un effet plafond.

La complexité de réaliser une évaluation selon une approche écologique

Selon Long (1996), la précision de la prédiction d'un outil d'évaluation écologiquement valide est déterminée par sa capacité à être corrélé aux comportements ciblés tels que manifestés dans le quotidien. Évidemment, la meilleure façon de savoir si une personne peut, par exemple, retourner travailler est d'obtenir une mesure directe de la performance en milieu d'emploi. Toutefois, ce genre d'observation n'est pas toujours rentable, efficiente ou même possible. Dans ces cas, des mesures moins directes peuvent parfois être utiles : simulation, entrevue structurée (avec le client ou un proche significatif), questionnaire, analyse de la qualité de la performance, etc. Ces observations peuvent permettre l'élaboration de prédiction en lien avec la performance telle que vue dans le quotidien. Cependant, l'utilisation de tests psychométriques traditionnels ou de ceux basés sur l'approche de véridicalité ne permet pas d'avoir une vision d'ensemble, globale, des comportements ciblés. Au mieux, il est possible d'observer des aspects spécifiques du fonctionnement de la personne en lien avec l'habitude de vie sélectionnée. Ainsi, l'évaluateur se trouve limité à des construits cognitifs circonscrits par les tests utilisés. Par conséquent, le défi de l'évaluation écologique, par comparaison à l'évaluation traditionnelle, consiste à sortir des construits cognitifs des tests utilisés pour développer une compréhension « fonctionnelle » de l'activité. Autrement dit, il importe de conceptualiser une situation d'évaluation qui prenne en considération : a) les actions à réaliser; b) les comportements dirigés vers le but exigé par la situation d'évaluation; c) les fonctions cognitives qui sont interpellées dans la réalisation de la tâche. Ces défis impliquent donc de développer des outils de mesure construits selon une

approche de vérisimilitude. À cet effet, Chaytor et Schmitter-Edgecombe (2003) ont mentionné que les épreuves de mémoire dites vérismilaires sont plus hautement corrélées aux habiletés cognitives du quotidien que les tests traditionnels. C'est pourquoi des études portant sur la validité écologique d'outils d'évaluation dits « vérismilaires » deviennent pertinentes et importantes.

L'utilité de la réalité virtuelle

Il est logique de penser, lorsque l'intention est d'obtenir un portrait réaliste du fonctionnement quotidien d'une personne, que la réalité virtuelle peut avoir un avantage sur les modalités traditionnelles d'évaluation. Le plus grand attrait que la réalité virtuelle présente est d'apparaître comme étant à la jonction du « meilleur des deux mondes », soit celui de reproduire des tâches réalistes, calquées sur le quotidien, dans un environnement standardisé, dans lequel des normes peuvent être développées. Toutefois, l'utilisation de la réalité virtuelle en tant qu'outil d'évaluation présente également ses éléments de complexité. D'abord, il y a le coût d'acquisition des équipements. Ensuite, il y a la nécessité de travailler en interdisciplinarité avec des spécialistes variés (infographistes, programmeurs analystes, neuropsychologues, etc.) dans le but d'élaborer un environnement virtuel qui puisse exactement répondre aux besoins en termes de réalisme, de représentativité tout en faisant le nécessaire pour inclure les éléments théoriques impliqués par les fonctions ciblées, nécessaires pour la réalisation de la tâche. Ensuite, il y a les difficultés de configuration et de compatibilité des logiciels et des appareils qui permettent en retour d'obtenir un haut niveau d'interactivité

avec l'environnement virtuel. Enfin, il serait possible de suggérer que ces mêmes équipements (souris, visiocasque, différents capteurs de mouvements, etc.) soient un frein au réalisme et à la représentativité de l'environnement virtuel, engendrant ainsi des doutes sur la validité écologique de la tâche.

Avec tous ces enjeux, dont principalement le dernier mentionné, il est difficile actuellement de dire si la réalité virtuelle est réellement un moyen d'évaluation écologique, représentatif du quotidien. Il n'est pas non plus possible de dire si une tâche intégrée dans un environnement virtuel est plus difficile, sensible ou spécifique qu'un outil d'évaluation traditionnel. Par contre, il est possible de dire que la réalité virtuelle a le potentiel de permettre le développement d'une tâche qui soit dynamique et représentative du quotidien. En d'autres mots, fidèle à l'approche de la vérisimilitude, elle permet de solliciter un ensemble de fonctions cognitives et d'observer leurs interactions pendant la réalisation de tâches aussi complexes que celles réalisées dans l'étude de la mémoire prospective. Ainsi, à la lumière de ces réflexions, il apparaît important d'imaginer de nouveaux protocoles d'évaluation écologique, pouvant inclure la réalité virtuelle, dans un courant qui pourrait se définir comme étant une « neuropsychologie du quotidien ».

La complexité de développer de nouveaux outils d'évaluation

La complexité de développer de nouveaux outils d'évaluation se situe autant sur le plan méthodologique que psychométrique. Tel que mentionné précédemment, le

développement de tests écologiquement valides doit tenir compte de plusieurs facteurs dont : la façon dont les fonctions cognitives interagissent dans des activités réalistes par rapport au quotidien, la capacité de démontrer le pouvoir prédictif de la nouvelle mesure en lien avec les comportements quotidiens, la nécessité de développer des tâches à la fois interactives, dynamiques, suffisamment longues et non structurées. En d'autres mots, la complexité de développer de nouveaux outils d'évaluation vient de la nécessité de considérer les construits théoriques des fonctions interpellées par la tâche, selon une approche de construction et de validation écologique, en contournant les limites des appareillages, pour davantage exploiter le potentiel des environnements virtuels.

À ce titre, Marcotte et Grant (2010) ont élaboré quelques recommandations en ce qui a trait au développement d'outils d'évaluation dont l'objectif principal serait de comprendre l'effet des lésions cérébrales sur le fonctionnement quotidien. Les points suivants tracent les principaux faits saillants.

Premièrement, selon ces auteurs, il serait intéressant de favoriser le développement et l'implantation de nouvelles mesures ayant une plus grande validité écologique. Ainsi, plutôt que d'essayer d'explorer les liens entre les mesures de laboratoire et le quotidien, il serait fructueux de développer de nouveaux tests qui permettent d'observer les comportements humains directement dans la vraie vie, dans toute leur complexité (Burgess et al., 2006; Kingstone, Smilek, & Eastwood, 2008). Selon Marcotte et Grant (2010), cette perspective permettrait l'élaboration de nouveaux construits théoriques en

ce qui concerne la façon dont la personne, par exemple, priorise et gère les complexités de la vie. Ces observations permettraient également de mieux comprendre les composantes et les processus qui sont en œuvre pendant la réalisation de ces activités complexes, telles que réaliser une intention par exemple.

Deuxièmement, en plus de développer des outils d'évaluation utilisant la réalité virtuelle, il serait aussi intéressant d'améliorer ou de diversifier les méthodes permettant de mesurer directement les comportements dans le quotidien. Pour cela, il semble important de définir des indicateurs fiables de mesures qui sont compatibles avec les comportements nécessaires à la réalisation des tâches quotidiennes. Plus spécifiquement, Marcotte et Grant (2010) suggèrent de développer l'utilisation de technologies qui permettent de capter directement le comportement au quotidien comme par exemple, la webcam.

Troisièmement, il est évident que de conceptualiser de nouvelles tâches selon une approche écologique conduit à la nécessité de développer aussi de nouvelles approches évaluatives. Pour ce faire, il apparaît également important de développer des algorithmes permettant de prédire le fonctionnement quotidien. Ainsi, il serait important de dégager, afin d'assurer une plus grande validité et une meilleure représentativité d'une tâche ciblée, l'ensemble des facteurs qui peuvent contribuer à la performance. Par exemple, dans le cas de la mémoire prospective, il est important d'identifier les facteurs d'ordre

cognitif, compensatoire, motivationnel, social, etc., pouvant prédire la performance dans le quotidien.

Ces suggestions mettent en lumière les défis méthodologiques inhérents à la construction et à la validation de nouveaux outils d'évaluation. Dans cet ordre d'idées, Campbell et al. (2009) ont souligné l'importance de développer des instruments écologiques utilisant les technologies de la réalité virtuelle et ce, afin d'implanter une approche standardisée permettant de mesurer les construits cognitifs selon un angle contemporain. Le but principal de telles démarches devrait être de donner accès à des épreuves pouvant refléter et prédire avec exactitude la performance d'une personne en lien avec sa vie quotidienne.

Finalement, pour le développement de recherches futures, afin de contribuer empiriquement à la théorie de la mémoire prospective, il devient important de démontrer comment chaque processus exécutif (monitorage, planification, gestion des imprévus, activation ou inhibition) vient contribuer à la réalisation de l'intention. Ainsi, il serait intéressant de pousser plus loin l'idée qu'il existe une sorte de « réseau » dans lequel les fonctions cognitives ciblées seraient en collaboration tout en gardant leur propre indépendance. Il serait aussi intéressant de faire la démonstration qu'il existe des tâches prospectives de type attentionnel alors que d'autres sont de type exécutif. Ceci est d'une grande importance dans un contexte thérapeutique car l'intervention devrait, dans ce cas précis, se faire sur des plans distincts. Enfin, il serait également fort intéressant de

documenter comment les variables psychologiques peuvent servir de prédicteurs de la performance cognitive d'une personne, ne serait-ce qu'en étudiant l'impact de composantes telles que l'anxiété, la personnalité, la motivation et l'autodétermination.

Références

- Alderman, N., Burgess, P. W., Knight, C., & Henman, C. (2003). Ecological validity of a simplified version of the multiple errands test. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 9, 31-44.
- Attrie, E. A., Dancey, C. P., & Pope, A. L. (2009). An assessment of prospective memory retrieval in women with chronic fatigue syndrome using a virtual-reality environment: An initial study. *CyberPsychology & Behavior*, 12, 379-385.
- Banville, F., & Nolin, P. (2000). Mémoire prospective: Analyse des liens entre les fonctions mnésiques et les fonctions frontales chez des adultes victimes d'un traumatisme craniocérébral. *Revue de Neuropsychologie*, 10(2), 255-279.
- Bertsch, S., Pesta, B. J., Wiscott, R., & McDaniel, M. A. (2007). The generation effect: A meta-analytic review. *Memory & Cognition*, 35, 201–210.
- Bigler, E. D. (2001). The lesions in traumatic brain injury: Implications for clinical neuropsychology. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 16, 95–131.
- Bisiacchi, P. S., Cona, G., Schiff, S., & Basso, D. (2011). Modulation of a Fronto-Parietal Network in Event-Based Prospective Memory: An rTMS Study. *Neuropsychologia*, 49(8), 2225-2232.
- Blanco-Campal, A., Coen, R. F., Lawlor, B. A., Walsh, J. B., & Burke, T. E. (2009). Detection of prospective memory deficits in mild cognitive impairment of suspected Alzheimer's disease etiology using a novel event-based prospective memory task. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 15(1), 154-159.
- Boian, R., Sharma, A., Han, C., Merians, A., Burdea, G., Adamovich, S., Recce, M., Tremaine, M., & Poizner, H. (2002). Virtual reality-based post-stroke hand rehabilitation. *Studies In Health Technology And Informatics*, 85, 64-70.
- Bouchard, S., Côté, S., & Richard, D. (2007) “Virtual Reality Applications for Exposure.” Dans D. Richard, & D. Lauterbach (Éds.), *Handbook of Exposure Therapies* (pp. 347-388). Florida, FL: Academic Press.
- Brandimonte, M. A., & Passolunghi, M. C., (1994). The effect of cue-familiarity, cue-distinctiveness, and retention interval on prospective remembering. *Quarterly Journal of Experimental psychology*, 47 (A), 565-588.

- Brandimonte, M., Einstein, G. O., & McDaniel M. A. (1996). Prospective memory: Theory and applications. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Brooks, B. M., Rose, F. D., Potter, J., Jayawardena, S., & Morling, A. (2004). Assessing stroke patients' prospective memory using virtual reality. *Brain Injury, 18*, 391-401.
- Bryanton, C., Bossé, J., Brien, M., Mclean, J., McCormick, A., & Sveistrup, H. (2006). Feasibility, motivation, and selective motor control: Virtual reality compared to conventional home exercise in children with cerebral palsy. *CyberPsychology & Behavior, 9*, 123-128.
- Burgess, P.W. (2000). Strategy application disorder: the role of the frontal lobe in human multitasking research. *Psychological Research, 63*, 279–288.
- Burgess, N., Maguire, E. A., & O'Keefe, J. (2002). The Human Hippocampus and Spatial and Episodic Memory. *Neuron, 35*(4), 625-641.
- Burgess, P. W., & Shallice, T. (1997). The relationship between prospective and retrospective memory: Neuropsychological evidence. Dans M. A. Conway (Éd.), *Cognitive models of memory*. (pp. 247-272). Cambridge, MA US: The MIT Press.
- Burgess, P. W., Alderman, N., Forbes, C., Costello, A., Coates, L. M. A., Dawson, D. R., Anderson, N. D., Gilbert, S. J., Dumontheil, I., & Channon, S. (2006). The Case for the development and use of "ecologically valid" measures of executive function in experimental and clinical neuropsychology. *Journal of the International Neuropsychology Society, 12*, 194-209.
- Burgess, P. W., Dumontheil, I., Gilbert, S. J., Okuda, J., Schölvinck, M. L., & Simons, J. S. (2008). On the role of rostral prefrontal cortex (area 10) in prospective memory. Dans M. Kliegel, M. A. McDaniel, & G. O. Einstein (Éds.), *Prospective memory: Cognitive, neuroscience, developmental, and applied perspectives*, (pp. 235-260). New York, NY: Lawrence Erlbaum Associates.
- Burgess, P. W., Gonen-Yaacovi, G., & Volle, E. (2011). Functional neuroimaging studies of prospective memory: What have we learnt so far? *Neuropsychologia, 49*(8), 2246-2257.
- Burgess, P. W., Quayle, A., & Frith, C. D. (2001). Brain regions involved in prospective memory as determined by positron emission tomography. *Neuropsychologia, 39*(6).
- Burgess, P. W., Scott, S. K., & Frith, C. D. (2003). The role of the rostral frontal cortex (area 10) in prospective memory: A lateral versus medial dissociation. *Neuropsychologia, 41*(8).

- Burgess, P. W., Simons, J. S., Dumontheil, I., & Gilbert, S. J. (2005). The gateway hypothesis of rostral PFC function. Dans J. Duncan, L. Philips, & P. McLeod (Éds.), *Measuring the mind: Speed, control and age*, (pp 215-246). London, UK: Oxford University Press.
- Burgess, P. W., Veitch, E., de Lacy Costello, A., & Shallice, T. (2000). The cognitive and neuroanatomical correlates of multitasking. *Neuropsychologia*, 38(6), 848-863.
- Burgess, P. W., Weitch, E., Cosello, A. L., & Shallice, T. (2000). The cognitive and neuroanatomical correlates of multitasking. *Neuropsychologia*, 38, 848–863.
- Burgess, P.W., Quayle, A., & Frith, C.D. (2001). Brain regions involved in prospective memory as determined by positron emission tomography. *Neuropsychologia*, 39, 545–555.
- Burgess, P. W., Alderman, N., Emslie, H., Evans, J., & Wilson, B. A. (1998). The ecological validity of tests of executive function. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 4, 547-558.
- Cabeza, R., Mazuz, Y. S., Stokes, J., Kragel, J. E., Woldorff, M. G., Ciaramelli, E., Moscovitch, M. (2011). Overlapping parietal activity in memory and perception: Evidence for the attention to memory model. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(8), 1-9.
- Campbell, Z., Zakzanis, K. K., Jovanovski, D., & Joordens, S. (2009). Utilizing virtual reality to improve the ecological validity of clinical neuropsychology: An fMRI case study elucidating the neural basis of planning by comparing the Tower of London with a Three-Dimensional Navigation Task. *Applied Neuropsychology*, 16, 295-306.
- Carlesimo, G. A., Casadio, P., & Caltagirone, C. (2004). Prospective and retrospective components in the memory for actions to be performed in patients with severe closed-head injury. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 10(5), 679-688.
- Castelnovo, G., Lo Priore, C., Liccione, D., & Cioffi, G. (2003). Virtual reality based tools for the rehabilitation of cognitive and executive functions: The V-STORE. *PsychNology Journal*, 3, 310-325.
- Ceci, S. J., & Bronfenbrenner, U. (1985). "Don't Forget to Take the Cupcakes out of the Oven": Prospective Memory, Strategic Time-Monitoring, and Context. *Child Development*, 56(1), 152-164.

- Chaytor, N., & Schmitter-Edgecombe, M. (2003). The ecological validity of neuropsychological tests: A review of the literature on everyday cognitive skills. *Neuropsychology review*, 13, 181-197.
- Cherner, M. (2010). Considerations in the cross-cultural assessment of functional abilities. Dans T. D. Marcotte, & I. Grant (Éds). *Neuropsychology of everyday functioning*, (pp. 209-221). London, UK: The Guilford Press.,,
- Chevignard, M. P., Soo, C., Galvin, J., Catroppa, C., & Eren, S. (2012). Ecological assessment of cognitive functions in children with acquired brain injury: A systematic review. *Brain Injury*, 26(9), 1033-1057.
- Cohen, J. D., & O'Reilly, R. C. (1996). A preliminary theory of the interactions between prefrontal cortex and hippocampus that contribute to planning and prospective memory. Dans M. Brandimonte, G. O. Einstein, & M. A. McDaniel (Éds.), *Prospective memory: Theory and applications*, (pp. 267- 295). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Conway M. A. (1997). Cognitive models of memory. Cambridge, MA: MIT Press.
- Côté, S., & Bouchard, S. (2006). La réalité virtuelle, un outil novateur en psychothérapie. *Psychologie Québec*, Juillet, 14-17.
- Cromby, J. J., Standen, P. J., Newman, J., & Tasker, H. (1996). Successful transfer to the real world of skills practiced in a virtual environment by students with severe learning difficulties. *Proceedings of the First European Conference on Disability, Virtual Reality, and Assistive Technology*, 103–107.
- Das, D. A., Grimmer, K. A., Sparnon, A. L., McRae, S. E., & Thomas, B. H. (2005). The efficacy of playing a virtual reality game in modulating pain for children with acute burn injuries: a randomized controlled trial. *BMC Pediatrics*, 5, 1-10.
- Davidson, R. J., Schwartz, G. E., & Shapiro, D. (1986). Consciousness and self-regulation: Advances in research and theory. Plenum Press.
- Davis, F. B. (1966). Analyse d'items. Éditions Nauwelaert : Louvain.
- DeLuca J., Schultheis, M. T., Madigan, N.K., Christodoulou, C., & Averill, A. (2000). Acquisition versus retrieval deficits in traumatic brain injury: Implications for memory rehabilitation. *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation*, 81, 1327-1333.

- Derrer, D. S., Howieson, D. B., Mueller, E. A., Camicioli, R. M., Sexton, G., & Kaye, J. A. (2001). Memory testing in dementia: How much is enough? *Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology*, 14(1), 1-6.
- Duncan, J., Philips, L., & McLeod, P. (2005). Measuring the mind: Speed, control and age. London, UK: Oxford University Press.
- Einstein, G. O., & McDaniel, M. A. (1990). Normal aging and prospective memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16, 717-726.
- Einstein, G. O., & McDaniel, M. A. (1996). Retrieval processes in prospective memory: Theoretical approaches and some new empirical finding. Dans M. Brandimonte, G. O. Einstein, & M. A. McDaniel (Éds). *Prospective memory: Theory and applications* (pp 115-142). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Einstein, G. O., McDaniel, M. A., Richardson, S. L., Guynn, M. J., & Cunfer, A. R. (1995). Aging and prospective memory: Examining the influence of self-initiated retrieval process. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21, 996-1007.
- Einstein, G. O., McDaniel, M. A., Thomas, R., Mayfield, S., Shank, H., & Morissette, N. (2005). Multiple process in prospective memory retrieval: Factor determining monitoring versus spontaneous retrieval. *Journal of Experimental Psychology: General*, 134, 327-342.
- Einstein, G.O., & McDaniel, M.A. (2004). *Memory fitness: A guide for successful aging*. New Haven, CN: Yale University Press.
- Elkind, J. S., Rubin, E., Rosenthal, S., Skoff, B., & Prather, P. A. (2001). Simulated reality scenario compared with the computerized Wisconsin Card Sorting Test: An analysis of preliminary results. *CyberPsychology and Behavior*, 4, 489-496.
- Ellis, J. (1996). Prospective memory or the realisation of delayed intentions: a conceptual framework for research. Dans M. Brandimonte, G.O. Einstein, & M. A., McDaniels (Éds.), *Prospective memory: Theory and applications*, (pp. 1-22). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Ellis, J. A., & Kvavilashvili, L. (2000). Prospective memory in 2000: Past, present and future directions. *Applied Cognitive Psychology*, 14, S1-S9.
- Ellis, J., Kvavilashvili, L., & Milne, A. (1999). Experimental tests of prospective remembering: the influence of cue-event frequency on performance. *British Journal of Psychology*, 90, 9-23.

- Farley, K. L., Higginson, C. I., Sherman, M. F., & MacDougall, E. (2011). The ecological validity of clinical tests of visuospatial function in community-dwelling older adults. *Archives of Clinical Neuropsychology, 26*(8), 728-738.
- Felmingham, K. L., Baguley, I. J., & Green, A. M. (2004). Effects of diffuse axonal injury on speed of information processing following severe traumatic brain injury. *Neuropsychology, 18*, 564–571.
- Fleming, J., Riley, L., Gill, H., Gullo, M.J., Strong, J., & Shum, D. (2008). Predictors of prospective memory in adults with traumatic brain injury. *Journal of the International Neuropsychological Society, 14*, 823–831.
- Franzen, M. D., & Arnett, P. A. (1997). The validity of neuropsychological assessment procedures. Dans H. W. Reese, & M. D. Franzen (Éds.), *Biological and neuropsychological mechanisms: Life-span developmental psychology*, (pp. 51-69). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Franzen, M. D., & Wilhelm, K. L. (1996). Conceptual foundations of ecological validity in neuropsychology. Dans R. J. Sbordone, & C. J. Long (Éds.), *Ecological validity of neuropsychological testing*, (pp. 91-112). Delray Beach, FL: St. Lucie Press.
- Garnier, C., Enot-Joyeux, F., Jokic, C., Le Thiec, F., Desgranges, B., & Eustache, F. (1998). Une évaluation des fonctions exécutives chez les traumatisés crâniens: l'adaptation du test des six éléments. *Revue de Neuropsychologie, 8*(3), 385-414.
- Glicksohn, J., & Myslobodsky, M., S. (2006). *Timing the future: The case for a time-based prospective memory*. Hackensack, NJ: World Scientific Publishing.
- Goldstein, G., & Beers, S. (1998). *Rehabilitation*. New York, NY: Plenum Press.
- Gonneaud, J., Kalpouzos, G., Bon, L., Viader, F., Eustache, F., & Desgranges, B. (2011). Distinct and shared cognitive functions mediate event- and time-based prospective memory impairment in normal ageing. *Memory, 19*(4), 360-377.
- Gordon, B. A., Shelton, J. T., Bugg, J. M., McDaniel, M. A., & Head, D. (2011). Structural correlates of prospective memory. *Neuropsychologia, 49*(14),.
- Gorini, A., Capideville, C. S., De Leo, G., Mantovani, F., & Riva, G. (2011). The role of immersion and narrative in mediated presence: The virtual hospital experience. *Cyberpsychology, Behavior and Social Networking, 14*, 99-105.
- Gould N. F., Holmes, M. K., Fantie, B. D., Luckenbaugh, D. A., Pine, D. S., & Gould, T. D., (2007). Performance on a virtual reality spatial memory navigation task in depressed patients. *American Journal of Psychiatry, 164*, 516–519.

- Graf, P., & Grondin, S. (2006). Time perception and time-based prospective memory. Dans J. Glicksohn, & M. S. Myslobodsky (Éds.), *Timing the future: The case for a time-based prospective memory*, (pp. 1-24). River Edge, NJ: World Scientific Publishing Co.
- Graf, P., & Utzl, B. (2001). Prospective memory: A new focus for research. *Consciousness and Cognition: An International Journal*, 10, 437-450.
- Groot, Y. C. T., Wilson, B. A., Evans, J., & Watson, P. (2002). Prospective memory functioning in people with and without brain injury. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 8, 645-654.
- Gruneberg M. M. & Morris P. E. (1992). *Aspects of memory*. London, UK: Routledge.
- Gruneberg, M. M., Morris, P. E., & Sykes, R. N. (1988). *Practical Aspects of Memory: Current Research and Issues (Vol 1) Memory in Everyday Life*. New York, NY: Wiley.
- Guynn, M. J. (2003). A two-process model of strategic monitoring in event-based prospective memory: Activation/retrieval mode and checking. *International Journal of Psychology*, 38(4), 245.
- Guynn, M. J. (2008). Theory of monitoring in prospective memory: Instantiating a retrieval mode and periodic target checking. Dans M. Kliegel, M. A. McDaniel, & G. O. Einstein (Éds.), *Prospective memory: Cognitive, neuroscience, developmental, and applied perspectives*, (pp. 53-76). New York, NY: Lawrence Erlbaum Associates.
- Henry, J. D., Macleod, M., Phillips, L. H., & Crawford, J. R. (2004). A meta-analytic review of prospective memory and aging. *Psychology and Aging*, 19, 27-39.
- Hitch, G. J., & Ferguson, J. (1991). Prospective memory for future intentions: Some comparisons with memory for past events. *European Journal of Cognitive Psychology*, 3, 285-296.
- Kalpouzos, G., Eriksson, J., Sjölie, D., Molin, J., & Nyberg, L. (2010). Neurocognitive systems related to real-world prospective memory. *Plos One*, 5(10), e13304-e13304.
- Karaseitanidis, I., Amditis, A., Patel, H., Sharples, S., Bekiaris, E., Bullinger, A., Tromp, P (2006): Evaluation of virtual reality products and applications from individual, organizational and societal perspectives - The "VIEW" case study. *International Journal of Man-Machine Studies*, 64(3), 251-266.
- Katz, N. (2005), Cognition and occupation across the life span. Bethesda, MD: AOTA.

- Katz, N., & Hartman-Maeir, A. (2005). Higher level cognitive functions enabling engagement in occupation. Dans N. Katz (Ed.), *Cognition and occupation across the life span*, (pp. 3-26). Bethesda, MD: AOTA.
- Kerns, K. A., & Mateer, C. A. (1996). Walking and chewing gum: The impact of attentional capacity on everyday activities. Dans R. J. Sbordone, & C. J. Long (Éds). Écological validity of neuropsychological testing, (pp. 147-169). New-York: St.Lucie Press.
- Kidder, D., Park, D., Hertzog, C., Morrell, R. (1997). Prospective memory and aging: The effects of working memory and prospective memory task load. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 4, 93–112.
- Kingstone, A., Smilek, D., & Eastwood, J. D. (2008). Cognitive Ethology: A new approach for studying human cognition. *British Journal of Psychology*, 99(3), 317-340.
- Kinch, J., & McDonald, S. (2001). Traumatic brain injury and prospective memory: An examination of the influence of executive functioning and retrospective memory. *Brain Impairment*, 2, 119–130.
- Kinsella, G., (2009). Everyday memory for everyday tasks: Prospective memory as an outcome measure following TBI in older adults. *Brain Impairment*, 11, 37-41.
- Kinsella, G., Murtagh, D., Landry, A., Homfray, K., Hammond, M., O’Beirne, L., Dwyer, L., Lamont, M., & Ponsford, J. (1996). Everyday memory following traumatic brain injury. *Brain Injury*, 10, 499–507.
- Kliegel, M., Eschen, A., & Thöne-Otto, A. I. T. (2004). Planning and realization of complex intentions in traumatic brain injury and normal aging. *Brain and Cognition*, 56, 43–54.
- Kliegel, M., Jäger, T., & Phillips, L. H. (2008). Adult age differences in event-based prospective memory: A meta-analysis on the role of focal versus nonfocal cues. *Psychology & Aging*, 23(1), 203-208.
- Kliegel, M., & Martin, M. (2003). Prospective memory research: Why is it relevant? *International Journal of Psychology*, 38, 193–194.
- Kliegel, M., Martin, M., McDaniel, M. A., & Einstein, G. O. (2002). Complex prospective memory and executive control of working memory: A process model. *Psychologische Beiträge*, 44, 303-318.

- Kliegel, M., McDaniel, M. A., & Einstein, G. O. (2000). Plan formation, retention and execution in prospective memory: A new approach an age-related effect. *Memory and Cognition, 28*, 1041-1049.
- Klinger, E., Chemin, I., Lebreton, S., & Marié, R-M. (2006). Virtual Action Planning in parkinson's disease: A control study. *Cybertherapy & Behavior, 9*(3), 342-347.
- Knight, C., Alderman, N., & Burgess, P. W. (2002). Development of a simplified version of the multiple errands test for use in hospital settings. *Neuropsychological rehabilitation, 12*(3), 231-255.
- Knight, R.G., Harnett, M., & Titov, N. (2005). The effects of traumatic brain injury on the predicted and actual performance of a test of prospective remembering. *Brain Injury, 19*, 27-38.
- Knight, R. G., Titov, N., & Crawford, M. (2006). The effects of distraction on prospective remembering following traumatic brain injury assessed in a simulated naturalistic environment. *Journal Of The International Neuropsychological Society, 12*(1), 8-16.
- Kuttuva, M., Boian, R., Merians, A., Burdea, G., Bouzit, M., Lewis, J., & Fensterheim, D. (2006). The Rutgers Arm, a rehabilitation system in virtual reality: A pilot study. *CyberPsychology & Behavior, 9*, 148-152.
- Kvavilashvili, L. (1998). Remembering intentions: testing a new method of investigation. *Applied Cognitive Psychology, 12*(6), 533-554.
- Kvavilashvili, L. & Ellis, J. (1996). Varieties of intention: Some distinctions and classifications. Dans M. Brandimonte, G. O. Einstein, & M. A. McDaniel (Éds), *Prospective memory: Theory and applications*, (pp. 23-51). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Laurencelle, L. (1998). Théorie et technique de la mesure instrumentale. Québec : Presses de l'Université du Québec.
- Law, A. S., Logie, R. H., & Pearson, D. G. (2006). The impact of secondary tasks on multitasking in a virtual environment. *Acta Psychologica, 122*, 27-44.
- Lawson, B. D., Graeber, D. A., Mead, A. M., & Muth, E. R. (2002). Signs and symptoms of human syndromes associated with synthetic experiences. Dans K. M. Stanney (Éd.), *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications*, (pp. 589-618). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.

- Lay, C. H. (1980). Procrastination and everyday memory. Dans M. M. Gruneberg, P., E. Morris, & R. N. Sykes (Éds). *Practical aspects of memory: Current research and issues*, (Vol 1, pp. 342-347). New York, NY: Wiley.
- Lee, J. H., Ku, J., Cho, W., Hahn, W. Y., KIM, I. Y., Lee, S-M., Kang, Y., Kim, D. Y., Yu, T., Wiederhold, B., Wiederhold, M. D., & Kim, S. I. (2003). A virtual reality system for the assessment and rehabilitation of the activities of daily living. *CyberPsychology & Behavior*, 6 (4), 383-388.
- Levin, H. U., & Kraus, M., F. (1994). The frontal lobes and traumatic brain injury. *The Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences*, 6, [Special issue: The frontal lobes and neuropsychiatric illness], 443-454.
- Levy, R. L., & Loftus, G. R. (1984). Compliance and memory. Dans J. E. Harris & P. E. Morris (Éds), *Everyday, memory action and absent-mindedness*, (pp 93-112). London, UK: Academic Press.
- Lewis, M. W., Babbage, D. R., & Leathem, J. M. (2011). Assessing executive performance during cognitive rehabilitation. *Neuropsychological Rehabilitation*, 21(2), 145-163.
- Lezak, M. D., Howieson, D. B., Bigler, E. D., & Tranel, D. (2012). *Neuropsychological assessment (5th ed.)*. New York, NY: Oxford University Press.
- Lillie, R. A., Kowalski, K., Patry, B. N., Sira, C., Tuokko, H., & Mateer, C. A. (2010). Everyday impact of traumatic brain injury. Dans T. D. Marcotte & I. Grant (Éds). *Neuropsychology of everyday functioning*, (pp. 302-330). London, UK: The Guilford Press.
- Logie, R. H., Maylor, E. A., Della Sala, S., Smith, G. (2004). Working memory in event- and time-based prospective memory tasks: Effects of secondary demand and age. *European Journal of Cognitive Psychology*, 16(3), 441-456.
- Long, C. (1996). Neuropsychological tests: A look at our past and the impact that ecological issues may have on our future. Dans R. J. Sbordone, & C.J. Long (Éds). *Ecological validity of neuropsychological testing*, (pp. 1-14). New-York, NY: St.Lucie Press.
- Long, C. J., and Collins, L. F. (1997). Ecological validity and forensic neuropsychological assessment. Dans R. J. McCaffrey, A. D. Williams, J. M. Fisher, & L. C. Laing (Éds.), *The Practice of forensic neuropsychology: Meeting challenges in the courtroom*, (pp. 153-164). New York, NY: Plenum.

- Manchester, D., Priestley, N., & Jackson, H. (2004). The assessment of executive functions: Coming out of the office. *Brain Injury, 18*(11), 1067-1081.
- Mandler, G. (1980). Recognizing: The judgment of prior occurrence. *Psychological Review, 87*, 252-271.
- Marcotte, T. D., & Grant, I. (2010). *Neuropsychology of everyday functioning*. New York, NY: Guilford Press.
- Marcotte, T. D., Scott, J. C., Kamat, R., & Heaton, R. K. (2010). Neuropsychology and the prediction of everyday functioning. Dans T. D. Marcotte & I. Grant (Éds.), *Neuropsychology of everyday functioning*, (pp. 5-38). New York, NY: Guilford Press.
- Martin, M., Kliegel, M., & McDaniel, M. A. (2003). The involvement of executive functions in prospective memory performance of adults. *International Journal of Psychology, 38*, 195–206.
- Martin, T., McDaniel, M. A., Guynn, M. J., Houck, J. M., Woodruff, C. C., Bish, J. P., Tesche, C. D. (2007). Brain regions and their dynamics in prospective memory retrieval: A MEG study. *International Journal of Psychophysiology, 64*(3), 247-258.
- Mattheis, R. J., Schultheis, M. T., Tiersky, L. A., DeLuca, J., Millis, S. R., & Rizzo, A. A. (2007). Is learning and memory different in a virtual environment? *The Clinical Neuropsychologist, 21*, 146-161.
- Mathias, J. L., & Mansfield, K. M. (2005). Prospective and declarative memory problems following moderate and severe traumatic brain injury. *Brain Injury, 19*, 271–282.
- Maujean, A., Shum, D., & McQueen, R. (2003). Effect of cognitive demand on prospective memory in individuals with traumatic brain injury. *Brain impairment, 4* (2), 135-145.
- McCue, M., and Pramuka, M. (1998). Functional assessment. Dans G. Goldstein, & S. Beers, (Éds.), *Rehabilitation* (113-129). New York, NY: Plenum.
- McDaniel, M. A., & Einstein, G. O. (2007). *Prospective memory: An overview and synthesis of an emerging field*. Los Angeles: Sage Publications.
- McDaniel, M. A., (1995). Prospective memory: Progress and processes. Dans D. L. Medin (Éd). *The psychology of learning and motivation*, (vol. 22, pp. 191-222). San Diego, CA: Academic Press.

- McDaniel, M. A., Einstein, G. O., & Rendell, P. G., (2008). The puzzle of inconsistent age-related declines in prospective memory: A multiprocess explanation. Dans M. Kliegel, M. A., McDaniel, & G. O. Einstein (Éds), *Prospective memory: Cognitive, neuroscience, developmental and applied perspectives*, (pp 141-160). New York, NY: Lawrence Erlbaum Associates.
- McDaniel, M. A., Einstein, O. G. (2000). Strategic and automatic processes in prospective memory retrieval: A multiprocess framework. *Applied Cognitive Psychology, 14*, S127-S144.
- McDaniel, M. A., Guynn, M. J., Einstein, G. O., & Breneiser, J. E. (2004). Cue focused and automatic-associative processes in prospective memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 30*, 605-614.
- McDaniel, M. A., Robinson-Riegler, B. & Einstein, G. O. (1998). Prospective remembering: Perceptually driven or conceptually driven ? *Memory & Cognition, 26*, 121-134.
- McGeorge, P., Phillips, L. H., Crawford, J. R., Garden, S. E., Della Sala, S., & Milne, A. B. (2001). Using virtual environments in the assessment of executive dysfunction. *Presence, 10*, 375–383.
- Meacham J. A. & Colombo, J. A. (1980). External retrieval cues facilitate prospective remembering in children. *Journal of Educational Research, 62*, 188-290.
- Medin D. L. (1995). The psychology of learning and motivation. San Diego, CA: Academic Press.
- Miotto, E. C., & Morris, R. G. (1998). Virtual planning in patients with frontal lobe lesions. *Cortex, 34*, 639-657.
- Morris, P. E. (1992). Prospective memory: Remembering to do things. Dans M. M. Grunberg, & P. E. Morris (Éds.), *Aspects of memory* (Vol. 1, pp. 196-221). London, UK: Routledge.
- Morris, R. G., Kotitsa, M., Bramham, J., Brooks, B., Rose, & F. D. (2002). Virtual reality investigation of strategy formation, rule breaking and prospective memory in patients with focal prefrontal neurosurgical lesions. Préc. 4th int'l conf. disability, virtual reality and assoc.tech., Hungry, 101-108.
- Norman, D. A. & Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behaviour. Dans R. J. Davidson, G. E. Schwartz, & D. Shapiro, D. (Éds). *Consciousness and Self-Regulation: Advances in Research and Theory*. Plenum Press.

- Norris, G., & Tate, R. L. (2000). The Behavioural Assessment of the Dysexecutive Syndrome (BADS): Ecological, concurrent and construct validity. *Neuropsychological Rehabilitation, 10*(1), 33-45.
- Pagni, C., Frosini, D., Ceravolo, R., Giunti, G., Unti, E., Poletti, M., Tognoni, G. (2011). Event-based prospective memory in newly diagnosed, drug-naive Parkinson's disease patients. *Journal Of The International Neuropsychological Society, 17*(6), 1158-1162.
- Parslow, D. M., Morris, R. G., Fleminger, S., Rahman, Q., Abrahams, S., Recce, M. (2005). Allocentric spatial memory in humans with hippocampal lesions. *Acta Psychologica, 118*, 123–147.
- Parsons T. D., Rizza A. A., & Buckwalter J. G. (2004). Back propagation and regression: comparative utility for neuropsychologists. *Journal of Clinical & Experimental Neuropsychology, 26*, 95–104.
- Parsons T. D., Rizzo A. A., Zaag C., Van der, McGee J. S., & Buckwalter J. G. (2005). Gender and cognitive performance: A test of the common cause hypothesis. *Aging, Neuropsychology & Cognition, 12*, 78–88.
- Parsons, T. D., Rizzo, A. A., Bamattre, J., & Brennan, J. (2007). Virtual reality cognitive performance assessment test. *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine, 5*, 163-171.
- Parsons, T. D., Silva, T., Pair, J., Rizzo, A. A. (2008). Virtual environment for assessment of neurocognitive function: Virtual reality cognitive performance assessment test. *Medicine Meets Virtual Reality, 16*, 351-356.
- Parsons, T. D., & Rizzo, A. A. (2008). Initial validation of a virtual environment for assessment of memory functioning: Virtual Reality Cognitive Performance Assessment Test. *Cyberpsychology and Behavior, 11*, 17-25.
- Passig, D., & Eden, S. (2001). Virtual reality as a tool for improving spatial rotation among deaf and hard-of-hearing children. *CyberPsychology & Behavior, 4*, 681-686.
- Pavawalla, S. P., Schmitter-Edgecombe, M., & Smith, R. E. (2012). Prospective memory after moderate-to-severe traumatic brain injury: A multinomial modeling approach. *Neuropsychology, 26*(1), 91-101.
- Peterson, D. (2005). International classification of functioning, disability and health: An introduction for rehabilitation psychologists. *Rehabilitation Psychology, 50*, 105–112.

- Petrides, M., & Milner, B. (1982). Deficits on subject-ordered tasks after frontal- and temporal-lobe lesions in man. *Neuropsychologia*, 20, 249-262.
- Phelps A., Fritchle A., Hoffman H. (2004). Passive vs Active virtual reality learning: The effects on short- and longterm memory of anatomical structures. *Studies in Health Technology & Informatics*, 98, 298–300.
- Phillips, L. H., Henry, J. D., & Martin, M. (2008). Adult aging and prospective memory: The importance of ecological validity. Dans M. Kliegel, M. A., Mc Daniel, & G. O. Einstein (Éds), *Prospective memory: Cognitive, neuroscience, developmental and applied perspectives* (pp 161-185). NewYork, NY: Lawrence Erlbaum Associates.
- Ponsford, J. L., Myles, P. S., Cooper, D. J., Mcdermott, F. T., Murray, L. J., Laidlaw, J., Cooper, G., Tremayne, A. B., Bernard, S. A. (2008). Gender differences in outcome in patients with hypotension and severe traumatic brain injury. *Injury*, 39, 67-76.
- Poppenk, J., Moscovitch, M., McIntosh, A. R., Ozcelik, E., & Craik, F. I. M. (2010). Encoding the future: Successful processing of intentions engages predictive brain networks. *NeuroImage*, 49(1), 905-913.
- Potvin, M., Rouleau, I., Audy, J., Charbonneau, S., & Giguère, J. (2011). Ecological prospective memory assessment in patients with traumatic brain injury. *Brain Injury*, 25(2), 192-205.
- Priore, C., Lo., Castelnuovo, G., & Liccione, D. (2003). Experience with V-STORE: Considerations on presence in virtual environments for effective neuropsychological rehabilitation of executive functions. *CyberPsychology and Behavior*, 6(3), 281-287.
- Rand, D., Basha-Abu Rukan, S., Weiss, P. L., & Katz, N. (2009a). Validation of the virtual MET as an assessment tool for executive functions. *Neuropsychological Rehabilitation*, 19, 583–602.
- Rand, D., Katz, N., Shahar, M., Kizony, R., & Weiss, P. L. (2005). The virtual mall: A functional virtual environment for stroke rehabilitation. *Annual Review of Cybertherapy and Telemedicine*, 3, 193–198.
- Rand, D., Weiss, P. L., & Katz, N. (2009b). Training multitasking in a virtual supermarket: A novel intervention following stroke. *American Journal of Occupational Therapy*, 63, 535-542.
- Raskin, S. (2004). Memory for intentions screening test. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 10(Suppl. 1), 110.

- Raskin, S., & Buckheit, C. (1998). Prospective memory in traumatic brain injury. Poster presented at the *Cognitive Neuroscience Society*, San Francisco, CA.
- Raskin, S.A., & Buckheit, C.A. (2000). *Memory for Intentions Screening Test*. Unpublished test.
- Raskin, S., & Buckheit, C. (2001). Novel measures of prospective memory. Poster presented at the *International Neuropsychological Society*, Boston, MA.
- Raskin, S. A., Buckheit, C. A., & Waxman, A. (2012). Effect of type of cue, type of response, time delay and two different ongoing tasks on prospective memory functioning after acquired brain injury. *Neuropsychological Rehabilitation*, 22(1), 40-64.
- Raspelli, S., Carelli, L., Morganti, F., Albani, G., Pignatti, R., Mauro, A., Poletti, B., Corra, B., Silani, V., Riva, G. (2009). A Neuro VR-Based version of the multiple errands test for the assessment of executive fucntions: a possible approach. *Journal of Cybertherapy and Rehabilitation*, 2(4), 299-313.
- Reid, D. T. (2002). The use of virtual reality to improve upper-extremity efficiency skills in children with cerebral palsy: A pilot study. *Technology & Disability*, 14, 53-61.
- Reynolds, J. R., West, R., & Braver, T. (2009). Distinct neural circuits support transient and sustained processes in prospective memory and working memory. *Cerebral Cortex*, 19(5), 1208-1221.
- Rizzo, A. A., & Kim, G. J. (2005). A SWOT analysis of the field of VR rehabilitation and therapy. *Presence, Teleoperators and Virtual Environments*, 14, 119–146.
- Rizzo, A. A., Bowerly, T., Buckwalter, J., Klimchuk, D., Mitura, R., Parsons, T.D. (2006). A virtual reality scenario for all Seasons: The Virtual Classroom. *CNS Spectrums*, 11, 35-44.
- Rizzo, A. A., Buckwalter, J. G., Bowerly, T., Van Der Zaag, C., Humphrey, L., Neumann, U., Chua, C., Kyriakakis, C., Van Rooyen, A., Sisemore, D. (2000). The Virtual Classroom: A virtual reality environment for the assessment and rehabilitation of attention deficits. *CyberPsychology & Behavior*, 3, 483-499.
- Robillard, G., Bouchard, S., Fournier, T., & Renaud, P. (2003). Anxiety and presence during VR immersion: A comparative study of the reactions of phobic and non-phobic participants in therapeutic virtual environments derived from computer games. *Cyberpsychology & Behavior*, 6(5), 467-476.

- Rubens, M. T., & Zanto, T. P. (2011). Characterizing the Involvement of Rostrolateral Prefrontal Cortex in Prospective Memory. *Journal of Neuroscience*, 31(25), 9067-9069.
- Sadowski, W., & Stanney, K. (2002). Presence in virtual environments. Dans K. M. Stanney (Éd.), *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications*, (pp. 791-806). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Sbordone, R. J. (1996). Ecological validity: Some critical issues for the neuropsychologist. Dans R. J. Sbordone, & C. J. Long (Eds), *Ecological validity of neuropsychological testing* (pp. 15-42). New York NY: St-Lucie Press.
- Sbordone, R. J. (2000). Ecological validity issues in neuropsychological testing. *Brain Injury Source*, 4(4), 10-12.
- Sbordone, R. J., and Long, C. J. (1996). Ecological validity of neuropsychological testing. New York, NY: St-Lucie Press.
- Schlessman, H. A. (2010). *Survivors of a silent epidemic: The learning experience of college students with a history of traumatic brain injury*. ProQuest LLC. Repéré à <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=eric&AN=ED523744&site=ehost-live>
- Shallice, T. (1988). From neuropsychology to mental structure. Cambridge University Press.
- Shallice, T., & Burgess, P. W. (1991). Deficits in strategy application following frontal lobe damage in man. *Brain*, 114, 727-741.
- Shum, D., Fleming, J. M., & Neulinger, K. (2002). Prospective memory and traumatic brain injury: A review. *Brain Impairment*, 3(1), 1-16.
- Shum, D., Valentine, M., & Cutmore, T. (1999). Performance of individuals with severe long-term traumatic brain injury on time-, event-, and activity-based prospective memory tasks. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 21, 49-58.
- Simons, J. S., Scholvinck, M. L., Gilbert, S. J., Frith, C. D., & Burgess, P. W. (2006). Differential components of prospective memory? Evidence from fMRI. *Neuropsychologia*, 44, 1388-1397.
- Sinnott, J. D. (1989). Prospective, incidental memory and aging: Memory as adaptative action. Dans L. Poon, R. David, & A. Barbara (Éds), *Everyday cognition in adulthood in late life*, (pp. 353-369). New York, NY: Cambridge University Press.

- Siu, D., & Graf, P. (2005) Plans for success: Improving prospective memory task performance. 2nd International conference on prospective memory. Zurich, Switzerland.
- Smith, R. E. (1999). *A new conceptualization of delayed intention performance: Initiation requires capacity. (memory)*. 60, ProQuest Information & Learning, US. Repéré à <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=psyh&AN=1999-95024-178&site=ehost-live>
- Smith, R. E. (2008). Connecting the past and the future: Attention, memory and delayed Intentions. Dans M. Kliegel, M. A., Mc Daniel, & G. O. Einstein (Eds) *Prospective Memory: Cognitive, neuroscience, developmental and applied perspectives*, (pp 29-52). New York, NY: Lawrence Erlbaum Associates.
- Smith, R. E., & Bayen, U. J. (2004). A multinomial model of event-based prospective memory. *Journal of experimental psychology: Learning, memory and cognition*, 30, 756-777.
- Smith, R. E., (2003). The cost of remembering to remember in event-based prospective memory: Investigating the capacity demands of delayed intention performance. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 29, 347-361.
- Smith, R. E., Hunt, R.R., McVay, J. C., McConnell, M. D. (2007). The cost of event-based prospective memory: Salient target events. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 33, 734-746.
- Sohlberg, M. M., Mateer, C. A., & Geyer, S. (1985). *Prospective memory survey*. Puyallup, WA: Association for Neuropsychological Research and Development.
- Spikman, J. M., Boelen, D. H. E., Lamberts, K. F., Brouwer, W. H., & Fasotti, L. (2010). Effects of a multifaceted treatment program for executive dysfunction after acquired brain injury on indications of executive functioning in daily life. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 16(1), 118-129.
- Spooner, D. M., & Pachana, N. A. (2006). Ecological validity in neuropsychological assessment: A case for greater consideration in research with neurologically intact populations. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 21(4), 327-337.
- Stanney, K. M., Kennedy, R. S., & Kingdon, K. (2002). Virtual environment usage protocols. Dans K.M. Stanney (Ed.) *Handbook of virtual environments : Design, implementation, and applications*. Mahwah, NJ: IEA.

- Sweeney, S., Kersel, D., Morris, R. G., Manly, T., & Evans, J. J., (2010). The sensitivity of a virtual reality task to planning and prospective memory impairments: Group differences and the efficacy of periodic alerts on performance. *Neuropsychological Rehabilitation*, 20(2), 239-263.
- Tannock, I. F., Ahles, T. A., Ganz, P. A., & van Dam, F. S. (2004). Cognitive impairment associated with chemotherapy for cancer: report of a workshop. *Journal of Clinical Oncology*, 22(11), 2233-2239.
- Tate, R. L., Broe, G. A., Cameron, I. D., Hodgkinson, A. F., & Soo, C. A. (2005). Pre-injury, injury, and early post-injury predictors of long-term functional and psychosocial recovery after severe traumatic brain injury. *Brain Impairment*, 6, 75-89.
- Thöne-Otto, A. I. T., Walther, K. (2008). Assessment and treatment of prospective memory disorders in clinical practice. Dans M. Kliegel, M. A., McDaniel, & G. O. Einstein (Éds), *Prospective memory: Cognitive, neuroscience, developmental and applied perspectives*, (pp 321-345). New York, NY: Lawrence Erlbaum Associates.
- Titov, N., & Knight, R. G. (2000). A procedure for testing prospective remembering in persons with neurological impairments. *Brain Injury*, 14(10), 877-886.
- Titov, N., & Knight, R. G., (2001) A video-based procedure for the assessment of prospective memory. *Applied Cognitive Psychology*, 15, 61-83.
- Titov, N., & Knight, R. G. (2005). A computer-based procedure for assessing functional cognitive skills in patients with neurological injuries: the virtual street. *Brain Injury*, 19(5), 315-322.
- Tupper, D., and Cicerone, K. (1990). The *neuropsychology of everyday life: Assessment and basic competencies*. Boston, MA: Kluwer Academic.
- Umeda, S., Nagumo, Y., & Kato, M. (2006). Dissociative contributions of medial temporal and frontal regions to prospective remembering. *Reviews In The Neurosciences*, 17(1-2), 267-278.
- Uttl, B. (2008). Transparent meta-analysis of prospective memory and aging. *PLoS ONE*, 3, 1-31.
- Vaishnavi, S., Rao, V., Fann, J. R. (2009). Neuropsychiatric problems after traumatic brain injury: unraveling the silent epidemic. *Psychosomatics*, 50, 198-205.
- Wechsler, D. (1997). *Wechsler Adult Intelligence Scale — Third Edition*. New York: Psychological Corporation.

- Weiss, P. L., Naveh, Y., & Katz, N. (2003). Design and testing of a virtual environment to train stroke patients with unilateral spatial neglect to cross a street safely. *Occupational Therapy International*, 10, 39-55.
- Werner, P., Rabinowitz, S., Klinger, E., Korczyn, A. D., Josman, N. (2009). Use of the virtual action planning supermarket for the diagnosis of mild cognitive impairment: a preliminary study. *Dementia & Geriatric Cognitive Disorders*, 27, 301-309.
- West, R. (2008). The Cognitive neuroscience of prospective memory. Dans M. Kliegel, M. A. McDaniel, & G. O. Einstein (Éds), *Prospective memory: Cognitive, neuroscience, developmental and applied perspectives*, (pp. 119-125). New York, NY: Lawrence Erlbaum Associates.
- West, R. L., (1988). Prospective memory and aging. Dans M. M. Gruneberg, P. E. Morris, & R. N. Sykes (Éds), *Practical aspects of memory: Current research and issues*, (Vol 1, pp. 342-347). New York, NY: Wiley.
- Wilkins, A. J., & Baddeley, A. (1978). Remembering to recall in everyday life: An approach to absentmindedness. Dans M. M. Gruenberg, P. E. Morris, & R. N. Sykes (Éds.), *Practical aspects of memory: Current research and issues*, (Vol. 1, pp. 27-34). New York, NY: Wiley.
- Wilson, B. A., Alderman, N., Burgess, P. W., Emslie, H., & Evans, J. J. (1996). *Behavioural Assessment of the Dysexecutive Syndrome*. England: Manual. Thames Valley Test Company.
- Wilson, B. A., Baddeley, A. D., & Cockburn, J. M. (1989). How do old dogs learn new tricks: teaching a technological skill to brain injured people. *Cortex*, 25(1), 115-119.
- Wilson, B. A., Cockburn, J., & Baddeley, A. (1985). *The Rivermead Behavioral Memory Test*. Titchfeld, UK: Thames Valley Test.
- Wilson, B. A., Evans, J. J., Emslie, H., Zangwill, O., Alderman, N., Burgess, P. W. (1998). The development of an ecologically valid test for assessing patients with a dysexecutive syndrome. *Neuropsychological rehabilitation*, 8 (3), 213–228.
- Wilson, B. A., Greenfield, E., Clare, L., Baddeley, A., Cockburn, J., Watson, P., Tate, R., Sopena, S., Nannery, R., & Crawford, J. R. (2010). *The Rivermead Behavioural Memory Test- Troisième édition*. Manuel d'administration et de cotation. Paris : Éditions du Centre de Psychologie appliquée.

- Wilson, B. A., Greenfield, E., Clare, L., Baddeley, A., Cockburn, J., Watson, P., Tate, R., Sopena, S., Nannery, R., & Crawford, J. R. (2010). The rivermead behavioural memory test- Troisième édition: Manuel d'administration et de cotation. Paris: Person.
- Wilson, B. A., Hazel, E., Foley, J., Shiel, A., Watson, P., Hawkins, K., Groot, Y., Evans, J. (2005) *Cambridge Prospective Memory Test* (CAMPROMPT). Florida, FL: Psychological resources assessment.
- Wilson, P. N., Foreman, N., & Stanton, D. (1997). Virtual reality, disability and rehabilitation. *Disability & Rehabilitation*, 19, 213-220.
- Witmer, B. G. S. M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 7(3).
- World Health Organization (2001). The International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF). Geneva: WHO. (Spikman, Boelen, Lamberts, Brouwer, & Fasotti, 2010).
- Zakzanis, K. K., Graham, S. J., Campbell, Z., & Mraz, R. (2004). Neuropsychological reductionism and a possible solution toward clinical and experimental measurement of real-world cognitive function and dysfunction. *Hellenic Journal of Psychology*, 1(3), 326–347.

Appendice A

**Caractéristiques médicales des participants présentant un traumatisme
craniocérébral ayant participé à l'étude du chapitre 2**

Sujet	Diagnostic	GCS	APT (en minutes)	Scan
1	TCC grave	3	30	SCAN (29-05-2006): œdème cérébral léger. Lésions axonales diffuses probables. IRM: (01-06-2006): Lésions pétéchiales sous-corticales frontales droites. Lésions pétéchiales sous-corticales temporales droites.
2	TCC grave	4	24	SCAN: Présence d'un minime hématome sous-arachnoïdien bilatéral des cornes occipitales.
3	TCC grave	6	n/d	SCAN (25-05-2003): Hématome sous-cutané frontal droit. IRM (28-05-2003): Foyer de signal hyperintense en pondération T2 au niveau de la substance blanche en frontal bilatéralement (prédomine à droite). Sans anomalie significative.
4	TCC modéré	13	n/d	SCAN: contusion hémorragique frontale gauche de 3mm sans œdème.
5	TCC modéré	10	10	SCAN : Hémorragie sous-durale dans la région sylvienne gauche, contusion parenchymateuse fronto-temporale droite.
6	TCC grave	7	14	SCAN (2007/06/03): Hémorragie sous-durale frontale droite, hémorragie sous-arachnoïdienne le long de la tente du cervelet, petit foyer millimétrique adjacent à l'aqueduc de Sylvius gauche, hémorragie sous-arachnoïdienne dans les 2 cornes occipitales, œdème cérébral diffus avec possibilité de dommage axonal diffus.
7	TCC grave	3	180	SCAN (23/03/2003): Hémorragie sous-arachnoïdienne sylvienne gauche et contusions cérébrales, hémorragie temporale (gauche > droite) et hémorragie sous-arachnoïdienne en frontal bilatéral, shift vers la droite de 2 mm.

Sujet	Diagnostic	GCS	APT (en minutes)	Scan
8	TCC grave	5	20	SCAN: Contusions hémorragiques en région temporale gauche et en région fronto-temporale droite, de même qu'une hémorragie intraventriculaire, une discrète hémorragie sous-arachnoïdienne en région pariétale droite, des hématomes en temporal gauche et deux au niveau du globus pallidus.
9	TCC modéré	14	0	SCAN (7-12-2000): Hémorragie sous-arachnoïdienne au niveau de la tente du cervelet et bilatéralement.
10	TCC grave	6	270	SCAN (05-12-2002) : Œdème cérébral diffus avec effacement des sillons à la convexité. Effacement du 3 ^e ventricule et affaissement du système ventriculaire. Les cisternes de la base sont toutefois encore identifiées.
11	TCC grave	3	1	SCAN (2007-07-15): Multiples pétéchies au niveau frontal bilatéral, pariétal postérieur qui sont toutes de tailles infracentimétriques. Légère zone d'œdème au pourtour. Présence de sédiments hémorragiques prédominants au niveau des ventricules latéraux gauches sur le ventricule latéral droit. Shift de la ligne médiane.
12	TCC grave	8	10	SCAN (2007-11-10): Petit foyer hémorragique de 13 mm en grand diamètre au niveau temporal gauche. SCAN (10-11-2007): Hématome intraparenchymateux temporal gauche. Présence de gonflements des tissus mous surtout en frontal bilatéral.

Sujet	Diagnostic	GCS	APT (en minutes)	Scan
13	TCC grave	7	30	SCAN (23-03-2007): Nombreuses pétéchies hémorragiques en frontal postérieur bilatéralement. Hématome de moins de 2 mm intraparenchymateux frontal gauche. Quelques pétéchies hémorragiques dans la région frontale gauche. Contamination hémorragique intra-ventriculaire dans les cornes occipitales.
14	TCC grave	3	8	SCAN (24-10-2005): Voile des cellules ethmoïdales, voile partiel du sinus maxillaire gauche et des cellules mastoïdiennes gauches. Fracture visible du massif facial. Une quantité minimale de sang est visible dans l'espace sous-arachnoïdien en temporal.
15	TCC modéré	11	1	SCAN (18-09-2007): Fracture occipitale droite non déplacée. Parenchyme normal
16	TCC grave	7	22	SCAN (9-09-2006): Foyers de pétéchies hémorragiques au niveau frontal bilatéralement de même qu'en temporal gauche sous forme de petites hyperdensités de 6 mm. SCAN (10-09-2006): Progression du foyer contusionnel temporal gauche qui est passé de 6 à 14 mm. En temporal droit, petit foyer hémorragique pétéchial plus marqué qu'à l'examen antérieur. Stabilité du foyer millimétrique pétéchiale frontale gauche.
17	TCC grave	10	9	SCAN (2008-07-13): Hématome sous-dural de 7 mm à la haute convexité droite. Petite hémorragie sous-arachnoïdienne dans la convexité droite. 2-3 contusions intraparenchymateuses à la haute convexité gauche.
18	TCC grave	8	15	SCAN : Contusions temporales supérieures droites, contusion et hémorragie sous arachnoïdienne pariétale droite, contusion du tectum mésencéphalique inférieur et hématome sous-dural à la tente du cervelet. Lésions axonales diffuses.

Sujet	Diagnostic	GCS	APT (en minutes)	Scan
19	TCC grave	7	25	SCAN (21-07-2005) : Hématome épidual temporal gauche. Fracture complexe non enfoncée, non déplacée de l'écaille temporale ipsi-latérale. Multiples contusions hémorragiques infracentimétriques.
20	TCC grave	3	16	SCAN (1-06-2006): Hémorragie sous-arachnoïdienne au niveau de la tente du cervelet. Compression bilatérale au niveau du mésencéphale plus marquée à gauche, témoignant de l'engagement de l'uncus gauche. Dérivation ventriculaire traversant le corps du ventricule latéral droit. Phénomènes contusionnels sévères en ornithofrontal gauche et en temporal gauche avec hémorragie. Contusion frontale latérale inférieure gauche et temporal supérieur adjacent.
21	TCC modéré	12	6	SCAN: Présence de pétéchies en frontal gauche, une suspicion d'un hématome sous-dural à la tente du cervelet et un œdème aux tissus mous extra-crâniens en pariétal gauche.
22	TCC modéré	13	14	SCAN (08-08-2008): Foyers hémorragiques contusionnels au niveau du cortex frontal gauche, à droite, près de l'incisure tensorielle, également sur la gauche et finalement dans la région temporaire droite à localisation corticale. Sang dans la citerne interpédonculaire et dans les espaces sous-arachnoïdiens à la haute convexité droite.
23	TCC grave	6	60	SCAN (21-01-2008): Œdème diffus. Citerne prérontique apparaît effacée. Fracture et contusion sous-durales.
24	TCC grave	5	150	SCAN (17-01-2007): Contusions hémorragiques pariétales et frontales droites. Hémorragie sous-arachnoïdienne en frontal gauche.
25	TCC grave	n/d	n/d	n/d

Sujet	Diagnostic	GCS	APT (en minutes)	Scan
26	TCC grave	7	12	SCAN (26/06/2007): Hématome sous-arachnoïdien bifrontal traumatique (droite >gauche); absence des sillons corticaux, de l'espace de la vallée sylvienne et d'une asymétrie des cornes temporales du système ventriculaire témoignant d'un œdème cérébral.
27	TCC grave	7	12	SCAN (2007-07/07): Petite hémorragie sous-arachnoïdienne au niveau de la convexité haute à gauche et un peu de sang dans la citerne interpédonculaire. Gonflement marqué des tissus mous de l'hémiface droite et de la région frontale droite
28	TCC grave	4	6	SCAN (20-05-2007): Œdème diffus du parenchyme cérébral sans autre anomalie significative décelable. SCAN (21-05-2007): Présence d'un petit hématome sous-dural de la faux interhémisphérique en latéral droit de 9 mm d'épaisseur. Hématomes sous-duraux bifrontaux hétérogènes de 3mm à droite et de 2.7 mm à gauche. Foyer de contusions parenchymateuses de 2.7 mm en frontal postérieur gauche. Œdème diffus. Présence d'une petite bulle d'air en intracrânien. Conclusion: hématomes sous-duraux bifrontaux avec extension au niveau de la faux interhémisphérique en latéral droit. Foyer de contusion frontale postérieure gauche.

Sujet	Diagnostic	GCS	APT (en minutes)	Scan
29	TCC grave	5	30	<p>SCAN (2005-06-28): Hémorragie sous-arachnoïdienne à la haute convexité droite. Petits foyers hyperdenses à la portion inférieure du thalamus gauche. Forte probabilité de nature hémorragique. Petite zone hémorragique suspectée sous-corticale, région frontale gauche près de la ligne médiane (foyer mm) sillons arachnoïdiens effacés par rapport à l'âge du patient. Système ventriculaire de petit calibre.</p> <p>IRM (2005/06/29) : Examen qui montre un foyer de contusions frontales, lésions axonales diffuses du pédoncule cérébral gauche et hémorragie sous-arachnoïdienne à la haute convexité et hématomes sous-duraux discrets en postérieur.</p>
30	TCC modéré	11	30	<p>SCAN (02/09/2007): Hématome épidual aigu à la convexité frontale gauche mesurant 16 mm d'épaisseur.</p> <p>Effet de masse sur le parenchyme cérébral avec légère déviation des structures de la ligne médiane droite d'environ 4 à 5 mm. Contusions hémorragiques punctiformes au niveau frontotemporal gauche sous-jacent à hématome épidual ainsi qu'une contusion hémorragique frontale gauche inférieure au-dessus du toit orbitaire gauche.</p>
31	TCC grave	5	n/d	<p>SCAN (23-10-): Hémorragie sous-durale de la tente du cervelet sans effet de masse; pétéchies temporales gauches et hémorragie sous-durale pariétale droite.</p> <p>IMR : (24/8/2006): Hémorragie sous-durale minime en occipital droit et léger œdème sous-cortical occipital gauche, contusion hémorragique péri-calleuse postérieure droite, hémorragie temporaire gauche sous insulaire, hémorragie sous-arachnoïdienne occipitale gauche et de la haute convexité. Contusion frontale droite et occipitale gauche.</p>