

LA REVALIDATION NEUROPSYCHOLOGIQUE : QUID DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE ?

Camara Lopez Maïté & Cleeremans Axel

CO3 - Consciousness, Cognition & Computation Group at CRCN - Center for Research in Cognition and Neurosciences and UNI - ULB Neurosciences Institute, Université Libre de Bruxelles (ULB), 1050, Brussels, Belgium.

Résumé

Les outils dont dispose le clinicien pour réaliser une prise en charge des troubles cognitifs restent insuffisants au regard du défi majeur que pose la rééducation neuropsychologique, à savoir la mise au point de méthodes favorisant le transfert des acquis aux situations de la vie quotidienne (Seron 2009). A cet égard, il a été suggéré que les technologies de réalité virtuelle offrent précisément la possibilité d'optimiser l'impact de la prise en charge cognitive sur le quotidien des patients. L'élaboration de prises en charge cognitives en réalité virtuelle se propose d'atténuer le clivage entre les potentialités limitées des outils actuels et les attentes croissantes des professionnels de la santé et de l'entourage familial à prédire les comportements de vie quotidienne et à rétablir l'autonomie du patient. A la lecture des données actuelles, et malgré un potentiel évident, la réalité virtuelle n'est pas encore véritablement d'actualité dans le programme de prise en charge des patients. Dans cet article, largement inspiré d'un chapitre de livre plus complet (Camara Lopez and Cleeremans 2016), nous proposons un rapide survol des atouts et des limites des technologies de réalité virtuelle en revalidation neuropsychologique.

Mots-clés : Réalité virtuelle, revalidation, validité écologique, mémoire, attention

Abstract

Current cognitive rehabilitation tools remain insufficient to promote the generalization of improvements to functional everyday activities (Seron, 2009). Virtual reality technologies have emerged as a valuable approach by providing patients with the opportunity to practice cognitive functions in the relevant ecological context. The development of neuropsychological rehabilitation in virtual reality aims to reduce the cleavage between the limited potential of current tools and the increasing expectations of health professionals and family circle to predict behaviors of daily life and to restore the patient's autonomy. Despite its obvious potential, virtual reality is not yet integrated in cognitive rehabilitation programs. In this article, largely inspired by a book chapter (Camara Lopez and Cleeremans 2016), we offer a quick overview of the strengths and limitations of virtual reality technologies in neuropsychological revalidation.

Key words : Virtual reality, revalidation, ecological validity, memory, attention

CONCEPTS FONDAMENTAUX DE LA REALITE VIRTUELLE

La réalité virtuelle (RV) est un terme employé pour décrire les environnements artificiels conçus par ordinateur permettant à un individu d'explorer et d'interagir avec des objets dans un espace-temps virtuel (Cherniack 2011). Chaque plateforme de RV se compose d'une interface sensorielle et d'une interface motrice (Figure 1).

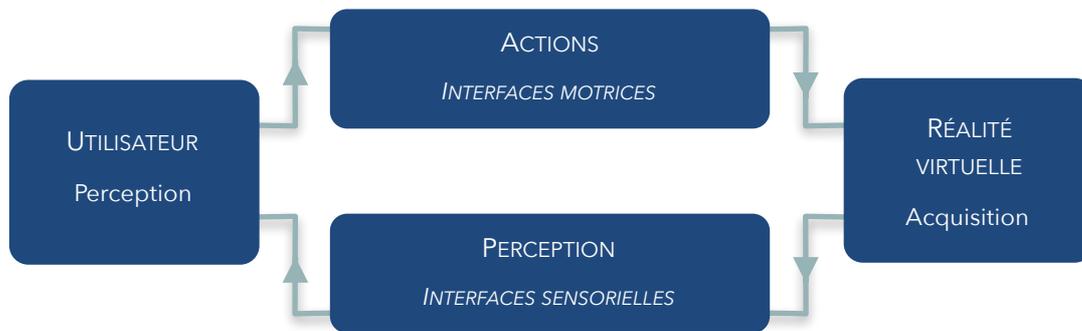


Figure 1 - Interface sensori-motrice indispensable au bon fonctionnement d'un système de réalité virtuelle (Fuchs and Moreau 2003).

L'interface sensorielle va permettre d'informer le joueur, à travers ses sens, de l'évolution de l'environnement virtuel et ainsi favoriser l'immersion (Fuchs and Moreau 2003). L'immersion naît alors d'une stimulation multisensorielle qui confère au sujet le sentiment de se trouver au sein même de l'environnement virtuel. Le nombre de sens stimulés (la vision, l'ouïe, le toucher, l'odorat et le goût) joue un rôle essentiel sur la qualité de l'immersion. A l'instar des situations de vie réelle, la redondance des indices lors d'une stimulation multisensorielle permet une meilleure compréhension de l'environnement virtuel et l'intégration plus rapide de ces multiples informations sensorielles en une expérience cohérente et complète (Hecht et al. 2006). Le degré d'immersion de l'interface de RV détermine alors le degré de « présence » : plus l'immersion est importante, plus le sujet est à même de faire l'expérience d'être réellement dans cet espace-temps virtuel et non plus dans son environnement physique (Bohil et al. 2011). Étant donné l'influence de nos cinq sens sur le sentiment d'immersion, un rapide tour d'horizon des différents sens et des choix matériels possibles s'impose.

La vision est considérée comme un des sens dominant chez l'homme. Le mode d'affichage de l'environnement virtuel joue dès lors un rôle déterminant dans l'immersion et le confort offert à l'utilisateur. Lorsqu'on aborde les technologies de RV, il est difficile de faire l'impasse sur le casque immersif ou HMD (*Head-Mounted Displays*) dont les initiatives de démocratisation pullulent. Ce type de casque permet d'afficher en 3D les images générées par ordinateur. En vue de faciliter l'immersion du sujet, un capteur de position de la tête reproduit les mouvements de celle-ci dans l'environnement virtuel (Baus and Bouchard 2014). Cependant, le casque immersif ne semble pas toujours être une solution adaptée. En effet, en raison de l'augmentation des effets secondaires avec l'âge, le casque immersif est à proscrire chez les personnes âgées, privilégiant plutôt la projection

sur un grand écran (Arns and Cerney 2005). De plus, son coût d'achat initial ainsi que les dépenses futures auxquelles devra s'astreindre l'utilisateur à mesure des avancées technologiques en matière de projection 3D représentent un second inconvénient.

L'immersion sonore joue aussi un rôle crucial par sa capacité à reproduire virtuellement des espaces grâce à une signature sonore spatialisée, fidèle à l'écoute naturelle. Le son fournit des informations qui, croisées aux autres stimuli perceptifs (visuels notamment) permettent une bonne compréhension de l'environnement. La restitution sonore peut s'adapter aux déplacements de l'utilisateur et aux changements d'orientation de sa tête pour donner au sujet l'illusion de percevoir la localisation des différentes sources sonores.

La stimulation haptique procure à l'utilisateur des sensations de toucher plus authentiques, facilitant aussi l'impression d'immersion et de présence (Hoffman et al. 1996). Ce supplément de tangibilité est possible grâce aux interfaces à retour d'effort qui évitent de traverser les objets et aux interfaces tactiles donnant une sensation de toucher différente pour chaque objet saisi. Il est ainsi possible de ressentir la forme, la matière et le volume des objets. Deux grandes limites à son utilisation dans le cadre de la clinique demeurent encore : ces accessoires sont très coûteux et limitent la diffusion des dispositifs de RV aux centres bénéficiant de moyens limités. De plus, ces appareillages encombrants et lourds sont intrusifs et peuvent affecter le sentiment de présence du sujet dans l'environnement virtuel. La stimulation haptique reste très peu intégrée aux programmes de réhabilitation neuropsychologique.

Enfin, le dernier sens récemment envisagé pour renforcer l'immersion est l'odorat, connu pour son pouvoir de projection particulièrement efficace. Le principe de la madeleine de Proust illustre bien la capacité du système olfactif à transporter une personne dans une réalité parallèle - dans ce cas, la reviviscence des souvenirs - plus efficacement que toute représentation photoréaliste (Ghinea and Ademoye 2011). Encore en développement, la stimulation olfactive reste complexe à mettre en oeuvre. Contrairement aux sens précédents, sa stimulation est chimique et implique de stocker les molécules odorantes nécessaires à l'expérience. Un autre défi à relever consiste à diffuser les stimuli olfactifs jusqu'au nez du sujet et à pouvoir passer rapidement d'une scène odorante à une autre sans que les senteurs ne s'entremêlent.

Néanmoins, en RV, la sollicitation simultanée de plusieurs modalités sensorielles est à l'origine d'un conflit sensoriel. Certains individus naviguant dans le monde virtuel rapportent un inconfort lié au degré d'immersion. Plus communément appelés *cybersickness*, ces symptômes peuvent aller d'un simple mal de tête à des vertiges voire nausées (Cherniack 2011). Ces symptômes, apparentés à ceux du mal des transports, seraient occasionnés par une incongruence sensori-motrice, un conflit entre l'information visuelle indiquant au sujet la sensation de mouvements et le système vestibulaire lui signalant l'immobilité (Bohil, Alicea and Biocca 2011). La prévalence de ce trouble, bien que marginale (5-10%), serait plus importante lorsque l'immersion est plus forte - avec un casque HMD, par exemple (García-Betances et al. 2015). Le sentiment de présence, connu pour favoriser le transfert des acquis du monde virtuel au monde réel, est également affecté par les symptômes de

type *cybersickness*. Inhibant difficilement ses propres informations sensorielles, le sujet malade ne parvient pas à faire abstraction du monde physique réel, ce qui diminue le sentiment de présence (Klinger et al. 2006). Des précautions peuvent être prises pour éviter ces désagréments : limiter la durée de l'immersion (Pedroli et al. 2015) ou adapter certains paramètres techniques - e.g. diminuer la vitesse de défilement des images, limiter la vitesse maximale de déplacement (Grewe et al. 2013). Afin de rester des plus compétitifs en proposant un système immersif à faible coût, la stimulation bimodale - visuelle et sonore - fait encore à ce jour l'unanimité.

L'interface motrice qui compose tout dispositif de réalité virtuelle offre au sujet la possibilité d'interagir avec le monde virtuel en exploitant ses propres comportements moteurs. L'interface motrice informe l'ordinateur des actions motrices de l'utilisateur sur le monde virtuel. De simple spectateur, l'utilisateur se transforme alors en un acteur à part entière. Intervenir sur le déroulé de l'expérience virtuelle est connu pour favoriser le sentiment de présence (Sheridan 1992). Les possibilités d'actions doivent être faciles à réaliser et intuitives. En référence au concept *d'illusion de non-médiation* proposé par Lombard et Ditton (1997), il faut que les outils d'interaction soient les plus transparents possibles jusqu'à pouvoir être oubliés au cours de l'expérience immersive. Ils ne doivent pas être perçus comme une gêne par l'utilisateur au cours de l'interaction. Une méthode censée satisfaire ces conditions de succès est l'interaction directe couplée à des schémas d'interaction naturels. Une interaction directe n'exploite pas d'autres interfaces que le corps de l'utilisateur (Slater and Sanchez-Vives 2016). Les interfaces utilisant des capteurs de mouvements, par exemple, répondent à la définition d'interfaces sans support matériel et proposent une transparence maximum puisque les mouvements à effectuer correspondent à ceux produits par le sujet en condition naturelle. Bien que les interfaces de commande par joystick, souris ou clavier soient plus souvent utilisées, elles compromettent l'illusion de non-médiation. La propriété de transparence reste envisageable si elle fait l'objet d'un apprentissage spécifique pour assurer l'intégration de la transposition du schéma naturel (marcher) en action symbolique (cliquer sur un bouton pour se déplacer dans l'environnement virtuel). Le principe consiste à assimiler les mouvements pour qu'ils deviennent, par leurs répétitions, des schémas d'usage (Fuchs and Moreau 2003). Atteindre un degré de transparence suffisant est indispensable pour éviter une surcharge cognitive qui risquerait de biaiser les résultats de l'évaluation en attribuant erronément une performance faible à un dysfonctionnement cognitif. Ce type de dispositif présente de nombreux avantages : simple d'utilisation, précis, ergonomique et accessible facilement puisque vendu en grande surface pour un prix démocratique (Standen et al. 2011).

Il semble que le degré d'immersion n'altère pas la fonction première des programmes de RV dédiés au champ de la neuropsychologie, à savoir l'évaluation et la rééducation des fonctions cognitives. Une étude récente a ainsi observé une amélioration des fonctions cognitives traitées indépendamment du type de dispositif employé - un casque immersif *versus* un écran d'ordinateur (Gamito et al. 2014). L'essor des applications de RV dans le domaine de la revalidation cognitive, qui a vu son nombre augmenter de manière significative cette dernière décennie, suggère un impact

positif de cette technologie sur les processus cognitifs rééduqués (Cipresso et al. 2014; Tieri et al. 2018).

UTILITÉ DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE EN RÉÉDUCATION ?

Les outils dédiés à la rééducation ont été vivement critiqués pour leur validité écologique limitée (Cherniack 2011). La validité écologique renvoie au caractère naturel de l'exercice proposé et à sa capacité à simuler les exigences d'une tâche réelle pour permettre de généraliser les conclusions des épreuves cognitives aux performances dans la vie réelle (Franzen and Wilhelm 1996). Actuellement, le neuropsychologue désireux de proposer des tâches fonctionnelles peut, si la structure d'accueil le permet, organiser des exercices de rééducation dans une pièce témoin (e.g. une cuisine) ou proposer au patient d'être investi d'une mission (e.g. aller acheter le journal dans une librairie). Ces mises en situation présentent de nombreuses limites : difficulté à standardiser des situations souvent trop simplistes, mise en place complexe et chronophage, analyse des performances peu détaillée (Parsey and Schmitter-Edgecombe 2013).

Afin de favoriser la résorption des préjudices fonctionnels liés aux troubles cognitifs, la RV propose des exercices de rééducation qui sont, d'une part, suffisamment contrôlables pour permettre une analyse fine des résultats et, d'autre part, suffisamment complexes pour tenter de reproduire les exigences du milieu réel (Chaytor and Schmitter-Edgecombe 2003). Par analogie avec le simulateur de vol permettant de développer les compétences de pilotage, la RV tente de simuler des environnements propices à la rééducation des habiletés fonctionnelles en y intégrant des stimuli qui reste difficiles à contrôler dans le monde réel (Rizzo and Kim 2005). En combinant la configuration des paramètres du scénario (e.g. les éléments distracteurs, les *feedbacks*, les données de temps et d'espace) à un enregistrement exhaustif des actions du sujet par le biais d'indicateurs fiables (e.g. temps de réponse, type et nombre d'erreurs, hésitations), il est dès lors possible de réaliser une analyse détaillée des performances, tout en considérant l'impact de chaque stimulus sur la performance du sujet (Cipresso, Serino, Pallavicini, Gaggioli and Riva 2014). De plus, le caractère attractif et porteur de sens de ces *serious game* permet de maintenir la motivation dans la réalisation des exercices proposés.

Un *Serious Game* - ou *Jeu Sérieux* en français - tente d'allier les nouvelles technologies à l'aspect ludique retrouvé dans les jeux vidéo pour créer des outils de rééducation plus attractifs où la finalité première est de jouer, voire de gagner (Susi et al. 2007). On citera, à titre d'exemple, la plateforme Curapy qui propose de mener à bien une bataille à l'aide d'un sous-marin tout en rééduquant différentes fonctions cognitives telles que la mémoire de travail ou l'attention sélective (www.curapy.com).

La pertinence d'une prise en charge renvoie à la question du transfert des acquis aux situations de vie quotidienne. Selon le modèle dynamique interactionnel de la cognition (Toglia 2011), l'application d'une approche thérapeutique conventionnelle au sein d'une activité écologique en RV est connue pour favoriser le transfert des acquis au-delà du cadre thérapeutique. Les stratégies de restauration, visant à rétablir la composante déficitaire dans son mode de fonctionnement antérieur, peuvent ainsi se voir implémenter au sein d'un programme de RV. La pratique d'exercices répétés et

présentés de façon hiérarchique (*drill*) dans un contexte écologique présenterait l'avantage d'optimiser l'entraînement ainsi que la généralisation et le transfert des acquis au monde réel (Rizzo and Kim 2005).

Grâce à son cadre sûr et standardisé, le patient en immersion est à même de prendre des initiatives, d'échouer et de recommencer. Cet apprentissage par essai-erreur va consolider les apprentissages sans devoir subir les conséquences réelles de leurs erreurs. A l'inverse, le principe d'apprentissage sans erreur peut aussi se voir implémenté dans une interface de RV. Il est ainsi possible de délivrer des indices dans l'environnement (e.g. visuels ou sonores) de sorte à adapter le niveau de difficulté et à éviter la production d'erreurs (Rizzo and Kim 2005). L'application d'une approche métacognitive dans un contexte écologique virtuel permet de généraliser plus facilement les apprentissages en condition de vie réelle (Jacoby et al. 2011). On citera, notamment, l'application de la méthode du *Goal Management Training* au sein d'un supermarché virtuel afin d'améliorer les capacités d'auto-régulation du patient. Cette procédure consiste alors à automatiser le cycle « STOP - Définir les objectifs - Lister les étapes - Apprendre - Vérifier » qui a largement fait ses preuves dans la rééducation des activités de la vie quotidienne (Dores et al. 2012).

La RV permet donc de donner plus de cohérence au projet de rééducation en proposant des exercices de revalidation plus écologiques. Expérimenter les conséquences fonctionnelles des déficits cognitifs dans un environnement sûr permettrait ainsi de favoriser la prise de conscience des répercussions des déficits dans la vie quotidienne et l'émergence d'une motivation à participer activement à la rééducation (Shin and Kim 2015). De plus, une récente étude a permis de démontrer une amélioration de la neuroplasticité cérébrale à la suite d'un entraînement multisensoriel en RV (Teo et al. 2016).

APPLICATIONS DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE EN RÉÉDUCATION NEUROPSYCHOLOGIQUE

Nous reprenons ici quelques applications récentes de RV afin d'en appréhender les tenants et aboutissants de cette approche dans la rééducation neuropsychologique.

Revalidation de l'attention

Dans le cadre de la rééducation de l'attention en RV, le Syndrome de Négligence Unilatérale (SNU) a fait l'objet de nombreuses recherches (Ogourtsova et al. 2017 pour une revue de la littérature). Ce syndrome se traduit par une incapacité à réagir et à s'orienter vers des stimulations présentées dans l'hémi-espace controlatéral à une lésion cérébrale. En rééducation, on préconisera l'utilisation combinée de deux grandes approches : le réentraînement de l'exploration visuelle volontaire dans l'espace contro-lésionnel (approche *Top-Down*) et les techniques de stimulation pour forcer le patient à explorer implicitement l'hémi-champ négligé (approche *Bottom-Up*) (Kerkhoff and Schenk 2012).

La RV est aujourd'hui considérée comme une approche prometteuse de par sa capacité à promouvoir une rééducation du SNU en combinant ces deux grandes approches au sein d'un même exercice de rééducation. Citons le programme RehAtt qui, à l'aide d'une interface à retour d'effort et des lunettes 3D, permet d'intégrer les mouvements du patient dans l'environnement virtuel 3D projeté sur un écran. Ce programme propose un réentraînement de l'exploration visuelle (approche *Top-Down*) combinée à une stimulation multi-sensorielle (approche *Bottom-Up*). La stimulation haptique, en combinaison avec un feedback vibrotactile, procure à l'utilisateur des sensations de toucher plus authentiques et tente ainsi de rediriger l'attention dans l'hémi-espace négligé et d'améliorer *in fine* la détection des cibles dans cette zone (Figure 2). Trois activités ludiques sont aujourd'hui disponibles à des fins de rééducation. L'une d'elles porte sur l'exploration visuo-spatiale et consiste à placer des figures géométriques provenant du dessus ou du côté gauche de l'écran dans un puzzle. Le programme RehAtt a été évalué par Fordell et collaborateur (2016) chez 15 patients ayant souffert d'un accident vasculaire cérébral (AVC) et présentant un SNU stable depuis 6 mois minimum. Différents exercices ludiques leur ont alors été proposés sur une durée de 5 semaines, à raison de 3 séances d'une heure par semaine. Une évaluation pré-post intervention a été réalisée sur base de 5 épreuves informatisées classiques et d'une échelle d'évaluation de la négligence spatiale en vie quotidienne. Suite à la prise en charge, les auteurs ont pu observer une amélioration aux épreuves informatisées classiques d'évaluation du SNU ainsi qu'à l'échelle d'évaluation de ces mêmes symptômes dans la vie quotidienne. Cette amélioration s'observe encore 6 mois après la fin de la prise en charge. Cette étude exploratoire laisse donc entrevoir le potentiel du programme RehAtt dans la rééducation du SNU et sa possibilité de transfert des améliorations dans la vie quotidienne.



Figure 2 Programme RehAtt dans la rééducation du SNU

De récentes méta-analyses sur la prise en charge des symptômes d'héminégligence mettent également en évidence le nombre restreint d'études rapportant une efficacité accrue de la RV par rapport aux thérapies conventionnelles. Malgré une meilleure détection du trouble, des investigations plus approfondies restent nécessaires pour attester de l'efficacité de la prise en charge en RV (Ogourtsova, Souza Silva, Archambault and Lamontagne 2017).

Revalidation de la mémoire

Des programmes de rééducation des fonctions mnésiques en RV ont récemment vu le jour, tant en ce qui concerne la mémoire épisodique que prospective ou spatiale.

1. La mémoire épisodique

La mémoire épisodique se prête bien à l'évaluation en RV (Repetto et al. 2016). Grâce aux environnements écologiques de RV, il est en effet possible d'évaluer la mémoire du *quoi*, du *quand*, du *où*, ainsi que des détails englobés dans la construction d'une trace mnésique distinctive (Picard et al. 2015). En dépit du nombre croissant d'études permettant la détection des troubles de mémoire épisodique, peu se sont attardées à sa prise en charge en RV.

Une étude récente a tenté de rééduquer la mémoire épisodique de patients dépressifs à l'aide d'une tâche de shopping au sein d'un magasin virtuel immersif (Dehn et al. 2018). Le sujet devait réaliser divers achats d'articles précédemment mémorisés. Ce programme, du nom d'OctaVis (Grewe, Kohsik, Flentge, Dyck, Botsch, Winter, Markowitsch, Bien and Piefke 2013), propose aux sujets, assis sur une chaise rotative entourée de 8 écrans tactiles, de visualiser l'environnement à 360 degrés et de sélectionner les objets de l'environnement par une pression sur l'écran (Figure 3). A l'instar d'un encodage multimodal en situation de vie réelle, ce dispositif permet d'établir des traces mnésiques distinctives en ayant recours aux capacités d'associations et de stockage d'informations verbales et visuo-spatiales - associer à chaque article de la liste des éléments contextuels du magasin virtuel - mais aussi motrices - déambuler à travers les allées grâce à la chaise pivotante et le joystick ainsi que saisir des articles par un mouvement du bras et de la main (Tulving E and Markowitsch 1998). Cet apprentissage multisensoriel tente de se rapprocher de celui qu'on pourrait expérimenter dans notre vie quotidienne. L'implication sensori-motrice contribue à la richesse de la trace mnésique. Le participant, maître de ses déplacements, consolide une représentation cohérente de l'événement, tout comme il le ferait dans la vie réelle (Sauzéron et al. 2015). Le programme d'entraînement était agencé sur une durée maximum de 14 jours : lors des 6 premières séances, les patients devaient mémoriser une liste de 20 articles (liste A) avec pour consigne de les acheter ensuite le plus vite possible (phase d'apprentissage). A la 7e séance, une liste interférente comprenant 20 nouveaux articles (liste B) leur était présentée avec la même consigne. A la suite de cet essai interférent, ils devaient rappeler les articles de la liste A avec pour consigne de les acheter ensuite le plus vite possible. Au cours de la dernière séance, les patients devaient rappeler les items de la liste A sans lecture préalable et les acheter le cas échéant en magasin. Afin de déterminer le réel potentiel du programme de revalidation en RV, un questionnaire sur les plaintes dans la vie quotidienne ainsi qu'un bilan neuropsychologique traditionnel ont été administrés en ligne de base et en fin de rééducation. Afin de s'assurer du transfert des acquis en condition réelle, les patients ont dû réaliser une tâche de shopping dans un supermarché. Les résultats de l'étude permettent de conclure à une augmentation du nombre d'articles achetés entre la première séance (liste A) et la septième séance (liste B), indiquant une amélioration des capacités d'apprentissage d'une nouvelle liste. Le temps nécessaire pour réaliser les différents achats diminue significativement entre la

première et la dernière séance, soulignant la capacité des patients à élaborer une représentation spatiale du magasin virtuel. Le transfert des acquis ne semble pas avoir eu lieu au regard du maintien des plaintes cognitives subjectives et des résultats inchangés à la tâche de shopping en condition réelle et aux épreuves neuropsychologiques (hormis la mémoire visuo-spatiale et des capacités de rotation mentale).

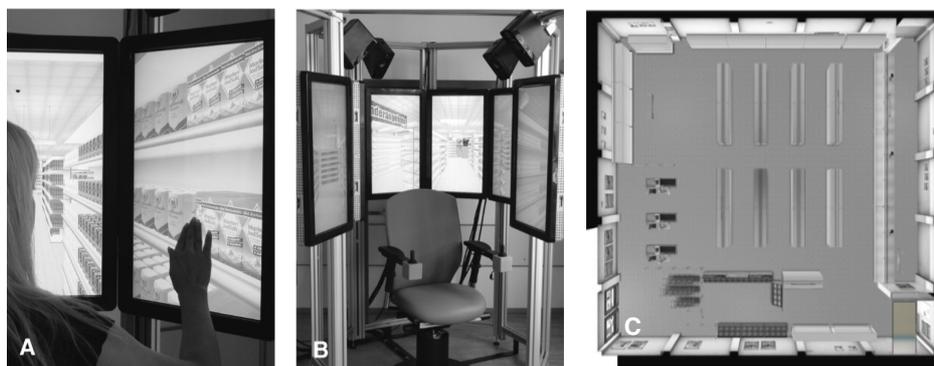


Figure 3 Programme immersif de rééducation de la mémoire épisodique : A. L'article disparaît une fois sélectionné par le sujet, celui-ci disparaît de l'écran B. La chaise pivotante entourée de 8 écrans tactiles permet de se mouvoir simplement et de sélectionner les articles en touchant l'écran C. Agencement du magasin virtuel.

2. La mémoire prospective

Souvent décrite comme le versant de la mémoire épisodique orienté vers le futur, la mémoire prospective se définit comme la mémoire des intentions programmées. On distingue trois types de tâches : la tâche *event-based* où l'action à initier est déterminée par l'apparition d'un événement cible ; la tâche *time-based* où l'action est à réaliser après un laps de temps déterminé ; et enfin, moins étudiée, la tâche *activity-based* où l'action est à réaliser à la suite d'un indice externe mais sans interruption de la tâche en cours (Einstein and McDaniel 1990).

Malgré la fréquence des problèmes de mémoire prospective et leurs conséquences dans la vie quotidienne, il n'existe à ce jour qu'un nombre limité d'études portant sur sa rééducation en RV. On citera à titre d'exemple, le programme d'entraînement non immersif de Mitrovic et collaborateurs (2016), conçu pour réduire la mémoire prospective chez des patients ayant souffert d'un AVC. Le participant réalise des tâches *time-based* (remplir la gamelle de croquette du chien à 10h01) et *event-based* (éteindre le four lorsque le minuteur retentit pour prévenir de la fin de cuisson). Cette étude, menée sur un échantillon de 15 patients, compare l'évolution des patients par le biais d'une ligne de base réalisée en pré- et post-intervention. Durant la phase de traitement, les patients ont pris part à 10 séances de rééducation de la mémoire prospective.

L'application de certaines approches thérapeutiques conventionnelles dans une activité simulée en RV permet d'atteindre plus facilement les objectifs thérapeutiques fixés et d'augmenter le potentiel

actuel des programmes de rééducation. Ainsi, un des objectifs de la rééducation consiste parfois à mettre en place des stratégies palliatives afin de contourner les déficits cognitifs et ainsi maintenir un niveau d'efficacité optimal dans les activités quotidiennes. Néanmoins, il est essentiel d'insister sur la nécessité de développer des programmes veillant à garantir l'apprentissage de ces techniques (Sohlberg and Mateer 1989) afin de favoriser leur utilisation efficace et autonome. La RV permet d'expérimenter au préalable ces différents moyens de compensation/stratégies dans des situations proches du réel et à terme de faciliter leur transfert dans la vie quotidienne (Schultheis and Rizzo 2001). Le programme de rééducation de Mitrovic et al. (2016) en est un bon exemple. Il propose aux personnes ayant souffert d'un AVC d'appliquer la technique d'imagerie mentale visuelle lors de la mémorisation des intentions à réaliser dans une maison virtuelle. En plus d'y appliquer la technique d'imagerie mentale dans un cadre plus écologique, ce programme propose une gradation du niveau de difficulté : au sein d'une maison virtuelle, le sujet est amené au fur et à mesure de son évolution à réaliser des intentions plus complexes, impliquant plusieurs sous-actions (éteindre la radio *versus* sortir le rôti du four une fois le temps imparti écoulé pour le placer sur la table). L'évaluation pré- et post-intervention intégrant une mesure classique de la mémoire prospective (le Cambridge Prospective Memory Test) a permis de conclure à l'amélioration des capacités de mémoire prospective en fin de prise en charge. Les auteurs observent un impact positif de la prise en charge après 4 semaines. Cette étude comporte néanmoins certaines faiblesses méthodologiques. Tout d'abord, l'étude ne permet pas de conclure à une généralisation de cet impact positif sur les capacités de mémoire prospective au quotidien. Le transfert des compétences acquises de l'environnement virtuel au monde réel devra par le futur être évalué de manière systématique chez tous les sujets par le biais d'un questionnaire sur les plaintes prospectives par exemple. Ensuite, le design de l'étude ne permet pas d'asseoir de conclusions quant à la réelle efficacité du programme de rééducation en RV. Le protocole devra par la suite intégrer au design expérimental un groupe de participants recevant un programme de rééducation conventionnel ciblé sur l'apprentissage de la technique d'imagerie mentale sans son implantation en RV afin d'établir la contribution relative de la RV.

3. Les fonctions exécutives

Faisant partie des fonctions supérieures, les fonctions exécutives sont continuellement sollicitées dans les situations complexes et nouvelles dirigées vers un but. En vue de rééduquer ces fonctions exécutives dans un cadre écologique proche des exigences du quotidien, l'activité « faire ses courses » a souvent été utilisée et différents supermarchés virtuels ont vu le jour. L'exécution d'une tâche de courses en RV impose aux sujets de planifier leurs comportements afin de respecter les contraintes imposées (produits spécifiques, parcours, etc.) (Klinger and Joseph 2008).

Afin de déterminer l'efficacité de l'application d'une approche métacognitive au sein d'un supermarché virtuel (VMall) dans la rééducation des fonctions exécutives, Jacoby et ses collaborateurs (2011) ont mené une étude randomisée et contrôlée sur un échantillon de 12 patients cérébrolésés (Jacoby et al., 2011). Le groupe expérimental réalisait un entraînement au sein du

VMall tandis que le groupe contrôle recevait une prise en charge traditionnelle sans RV. Chaque groupe devait s'acquitter de tâches impliquant la planification et la gestion de plusieurs tâches selon la stratégie cognitive basée sur la résolution de problème. Une mesure pré-post intervention combinait la réalisation d'une série d'achats dans un magasin réel (Multiple Errands Test - Version simplifiée ou MET-VS) et un ensemble de 4 tâches de résolution de problèmes liées au quotidien comme passer un appel téléphonique ou payer une facture (Baum et al. 2008). Le groupe ayant réalisé les séances de rééducation en RV obtint une amélioration des performances aux deux tâches significativement plus importante par rapport au groupe contrôle. Ces patients étaient donc capables de réaliser un transfert des stratégies employées dans un supermarché virtuel à une activité similaire en condition réelle (MET-VS) et à des activités instrumentales additionnelles.

LES LIMITES DE L'UTILISATION DE LA REALITE VIRTUELLE EN CLINIQUE ?

En dépit de l'intérêt croissant des chercheurs et des récentes conclusions attestant de son efficacité, la RV ne semble pas encore trouver preneur dans le monde de la neuropsychologie clinique (Ogourtsova, Souza Silva, Archambault and Lamontagne 2017; Rosa et al. 2016; Tieri, Morone, Paolucci and Iosa 2018). Malgré l'engouement général pour cette technologie, la RV ne semble pas répondre aux exigences imposées par le cadre clinique :

Dispositif simple, de faible coût et mobile

D'un point de vue économique, et malgré une baisse du coût de l'équipement ces dernières années, les prix actuels peuvent encore paraître prohibitifs et constituer un obstacle à l'achat des programmes de RV. L'ordinateur est l'élément indispensable de tout système de RV puisqu'il va, en temps réel, générer l'environnement virtuel et les comportements des personnages virtuels mais aussi les transformer en fonction des actions de l'utilisateur en gérant les différentes interfaces (Klinger and Joseph 2008). Un ordinateur récent doté d'une bonne carte graphique et d'une carte son est indispensable. Il faut ensuite se munir d'une interface sensorielle afin de retranscrire l'environnement et les actions du sujet dans l'environnement virtuel. Rares sont les unités de neuropsychologie à pouvoir s'affranchir des contraintes financières et d'espace liées aux dispositifs complexes et coûteux comme le système CAVE - *Cave Automatic Virtual Environment* (Figure 4). Simple et plus économique, le dispositif permettant de retranscrire l'information visuelle est le plus souvent un écran d'ordinateur. Le casque immersif est aussi employé. L'interface motrice permet quant à elle d'interagir dans l'environnement virtuel. Il existe, d'une part, les méthodes directes, basées sur l'enregistrement des comportements naturels du participant par le biais de capteurs de mouvements et d'autre part, les méthodes plus indirectes qui impliquent la manipulation d'un dispositif pour retranscrire les mouvements. Celles-ci incluent un clavier, une souris ou un joystick. Il est donc essentiel de choisir une interface sensorielle et motrice offrant le meilleur compromis

entre immersion, présence, coût et espace. Sans oublier qu'à ces dépenses en matériel, il faudra ajouter des frais liés à la licence d'utilisation du programme de RV.

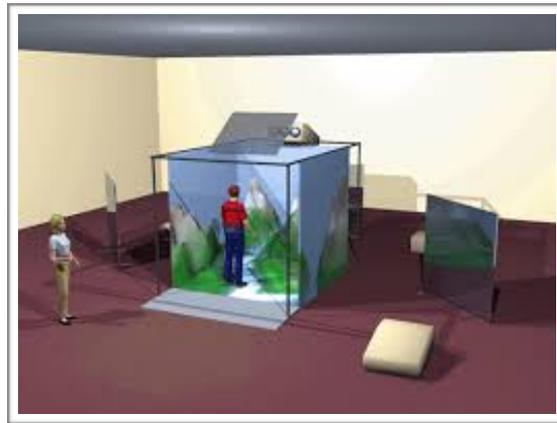


Figure 4 - Schéma représentant le système CAVE constitué de multiples écrans de projection synchronisés immergeant l'utilisateur dans un environnement géométriquement cohérent grâce à une projection d'images sur les murs et le sol (image tirée du site: <http://www.indiana.edu/~rcapub/v21n2/p28.html>)

Ouverture du dispositif et interface ergonomique

D'un point de vue technique, le personnel soignant ne possède pas, le plus souvent, les compétences nécessaires en informatique pour profiter du potentiel offert par cette technologie (Rizzo & Kim, 2005). Adapter un programme de rééducation aux spécificités d'un patient peut s'avérer trop complexe pour une personne sans connaissances en programmation informatique. Outre le coût lié à l'achat, il faut alors s'acquitter de frais supplémentaires pour toutes modifications ultérieures souhaitées ; de même pour l'extraction des données, l'analyse et la visualisation des performances. Exploiter un fichier brut contenant des centaines de résultats n'est pas pertinent pour un neuropsychologue clinicien. Afin d'intégrer la RV à la pratique clinique, toute application doit pouvoir rendre l'extraction facile et ciblée sur des indices pertinents pour le clinicien et être personnalisable sans l'aide d'un programmeur externe.

Légitimité de la RV dans la prise en charge cognitive

En vue de démontrer la légitimité des interventions neuropsychologiques en RV, les protocoles de recherche doivent faire preuve de plus de rigueur scientifique pour asseoir le pouvoir de la RV à promouvoir le transfert des acquis aux situations de vie quotidienne et leur maintien dans le temps. La ligne de base doit donc obligatoirement comporter un bilan neuropsychologique classique - pour asseoir la validité convergente/divergente¹ - et une évaluation fonctionnelle (Wilson 2002). Concernant la composition des échantillons, certaines études se basent sur la seule présence d'une plainte subjective comme critère d'inclusion (par exemple l'étude de Katz et al. 2005), or, des

¹ Validité convergente : exploration de la relation entre la performance en RV et des mesures traditionnelles basées sur des construits théoriques similaires. Validité divergente : comparaison de la performance en RV avec des tâches théoriquement opposées.

déficits cognitifs différents peuvent être à l'origine d'un même handicap fonctionnel et les plaintes subjectives ne reflètent pas nécessairement l'importance des difficultés. Cette variabilité pourrait limiter le potentiel de la rééducation. Même dans le cadre d'une rééducation plus fonctionnelle, il est donc indispensable de commencer par un bilan neuropsychologique visant à identifier les composantes déficitaires. Tenir compte de l'hétérogénéité des manifestations cliniques sous le couvert d'une même pathologie lors de l'évaluation de l'efficacité d'un programme de RV est indispensable pour appréhender son réel potentiel. Dans le cadre d'un SNU, les manifestations cliniques peuvent toucher plus particulièrement l'espace personnel, péri- ou extra- personnel et, dès lors impacter différemment le potentiel de la prise en charge proposée. Un autre facteur confondant à prendre en considération dans l'analyse de l'efficacité de la prise en charge en RV est le degré de sévérité des symptômes. En effet, une symptomatologie plus prononcée dans le groupe de RV peut contribuer à minimiser, voire masquer une différence entre les deux groupes au niveau de l'évaluation post-rééducation (Katz, Ring, Naveh, Kizony, Feintuch and Weiss 2005 par exemple). Afin d'établir l'efficacité d'une prise en charge sur le long terme, il est nécessaire d'intégrer au protocole de recherche une mesure des effets du traitement sur le long terme.

PERSPECTIVES

L'intégration de la RV dans le monde de la clinique doit tenir compte des limites économiques et techniques qui ressortent de la littérature. Au travers de ce dédale de possibilités techniques et technologiques, il est essentiel de trouver le compromis idéal qui propulsera la RV dans le monde de la clinique (Figure 5).

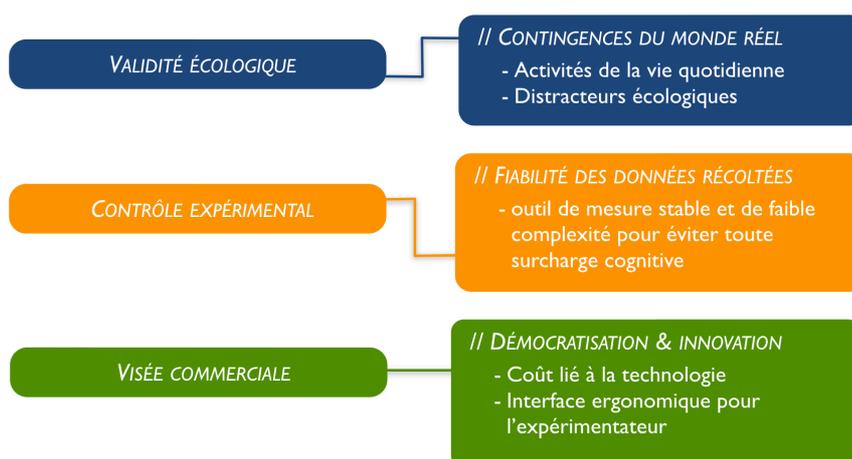


Figure 5 Tout en alliant la validité écologique et le contrôle expérimental, deux grands avantages de la RV, il est essentiel de diriger les choix conceptuels et matériels selon les exigences du cadre clinique.

Dans le cadre d'une rééducation, il peut parfois s'avérer pertinent de créer de nouveaux scénarios ou d'ajuster un scénario existant aux besoins spécifiques du patient en modifiant

facilement la présentation des stimuli, la complexité de la tâche, la réponse exigée et le type de feedback en fonction des troubles cognitifs du patient (Paravati et al. 2017). Les programmes d'évaluation et de rééducation des fonctions cognitives disponibles aujourd'hui sont très peu personnalisables. La création de scénarios de RV est donc l'apanage de professionnels dotés de solides compétences en programmation informatique. Dans le but de promouvoir la personnalisation de scénarios auprès des professionnels de la santé, l'apprentissage d'un code et de sa syntaxe, sensibles à la moindre faute, n'est donc pas envisageable. Il est aujourd'hui possible de se tourner vers un langage de programmation visuel qui permet à des non-initiés d'aborder la programmation sans possibles erreurs de syntaxe. Cette ouverture du dispositif de RV passe par l'utilisation d'une interface spécifiquement dédiée à cet effet, un *éditeur de scénarios* permettant de créer des scénarios sur mesure au sein d'environnements 3D interactifs sans s'appuyer sur un langage de programmation.

La plateforme gratuite NeuroVR 2 de Riva et ses collaborateurs (2011) est une des rares plateformes en open-source permettant à un utilisateur non expert de construire, sur base de 14 environnements préétablis, un environnement virtuel répondant aux besoins d'un cadre thérapeutique spécifique. Sa caractéristique principale repose sur sa capacité à contrôler le cadre et les interactions que le patient sera amené à rencontrer dans des environnements proches des situations de la vie quotidienne (maison, supermarché, restaurant, plage, etc.). Le neuropsychologue peut choisir, au sein d'une bibliothèque d'objets en 2D ou en 3D, les stimuli qui constitueront l'environnement choisi. Il est possible de déterminer la place de chaque objet, de rajouter un contenu audio/vidéo et de définir la réaction de l'environnement aux futures actions du patient. Une analyse ergonomique qualitative a cependant mis en évidence de nombreuses difficultés à adapter les environnements aux objectifs cliniques pour une personne sans connaissances en programmation informatique. Le confort d'usage et la simplicité d'emploi énoncée par les créateurs de l'outil semblent compromis par une trop grande marge de liberté offerte à l'utilisateur, qui s'avère être un source majeure de bugs potentiels. De plus, les possibilités de mesure de l'activité du participant sont très limitées.

Beaucoup plus intuitif, le programme R.O.G.E.R. (*Realistic Observation in Game and Experience in Rehabilitation*), est un dispositif de RV qui prend en considération les limites économiques et techniques particulières à la clinique (<http://rogerplatform.weebly.com>). Ce logiciel est composé de deux interfaces : (1) l'environnement virtuel lui-même, pensé et conçu pour s'adapter aux personnes souffrant d'altérations cognitives et/ou motrices (Figure 6A et 6D) ; (2) l'interface utilisateur, appelée aussi *éditeur*, spécifiquement dédiée aux chercheurs et professionnels de la santé désireux de concevoir des scénarios personnalisés (Figure 6E). Ce programme développé en collaboration avec des cliniciens a tenté de trouver le meilleur compromis entre la possibilité de personnalisation de l'expérience de jeu, la difficulté et les ressources nécessaires qu'impliquent un trop grand nombre de paramètres à configurer. Le choix d'une maison virtuelle s'explique essentiellement par l'éventail de tâches écologiques de la vie quotidienne qu'il est possible d'implémenter dans cet environnement (cuire un poulet au four, mettre une machine à laver, relever le courrier au passage du facteur, etc.). Pour préserver cet aspect gamifié que l'on

retrouve dans les *Serious Game*, quatre personnages (un facteur ou un policier par exemple) et un chien en trois dimensions peuvent être intégrés dans l'environnement virtuel afin de promouvoir le caractère ludique et réaliste de l'environnement (Figure 6B et 6C.). Ces différents avatars peuvent déambuler, parler et s'animer facilement grâce à l'éditeur qui s'inspire du langage de programmation *drag-and-drop* employé dans les programmes d'initiation au codage destinés aux enfants. Son principal avantage est bien évidemment sa simplicité d'utilisation : toute personne capable de choisir un élément (une *brique*) dans une liste est potentiellement capable de l'utiliser. A l'instar des briques de construction Lego, l'utilisateur doit agencer les briques sans nécessité de connaître la syntaxe du code en application (Figure 6E). L'étude menée par Schneider et collaborateurs (2004) montre combien le fait d'intégrer les différentes actions de l'utilisateur dans une histoire (ou scénario) permet d'augmenter l'intérêt du jeu et incite l'utilisateur à s'impliquer et à se projeter plus profondément dans le jeu. L'éditeur permet d'intégrer le programme de rééducation dans des scénarios moins linéaires et prévisibles afin d'y apporter un caractère plus écologique et donc favoriser l'immersion. L'exercice proposé peut ainsi être contextualisé : dans le cadre d'une tâche de mémoire prospective, l'avatar donne différentes recommandations que le patient devra réaliser durant son absence, et qui s'avèrent être des intentions de type *time-based*, *event-based* et *activity-based*. Encore en développement, ROGER intégrera très prochainement une interface d'analyse des performances obtenues suite à la réalisation d'un scénario.

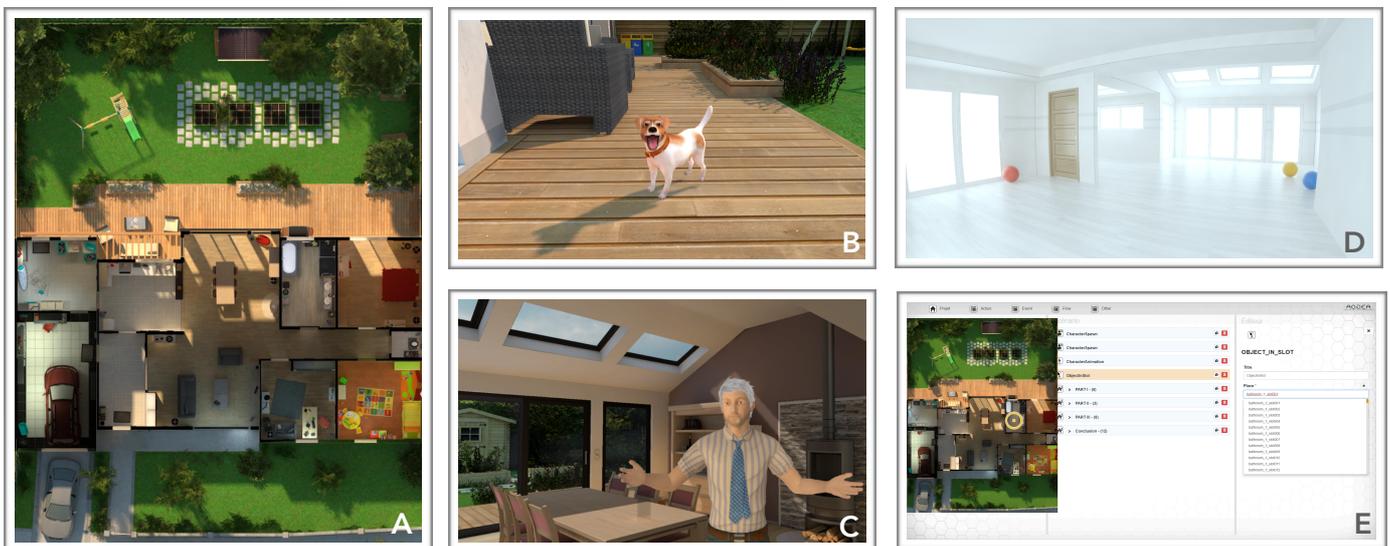


Figure 6 Images tirées du programme de réalité virtuelle R.O.G.E.R. (*Realistic Observation in Game and Experience in Rehabilitation*). Center for Research in Cognition & Neurosciences, Université Libre de Bruxelles. Programme financé par la Région Wallonne, Belgique (DGO6).

CONCLUSION

Les technologies de RV gagnent à être considérées comme des outils de réhabilitation à part entière utiles à la clinique. Les environnements virtuels permettent aux patients de s'exercer dans des tâches fonctionnelles au sein d'environnements proches de ceux qu'ils peuvent rencontrer dans la vie réelle (Shin and Kim 2015). Néanmoins, la majorité des interfaces de RV n'est qu'à un stade de recherches.

Nous savons que des déficits différents peuvent être à l'origine d'un même handicap, contraignant ainsi à personnaliser chaque prise en charge (Katz, Ring, Naveh, Kizony, Feintuch and Weiss 2005). S'attacher à débiter une prise en charge par des exercices écologiques en RV pourrait donc s'avérer infructueux. Or, la rééducation ciblée d'un processus cognitif déficitaire au moyen de ces mises en situation virtuelle reste complexe à mettre en place (Chaytor and Schmitter-Edgecombe 2003). A titre d'exemple, l'exécution d'une série d'achats au sein d'une ville virtuelle impose aux sujets de planifier leurs comportements afin des respecter les contraintes imposées. Cette tâche requiert plusieurs fonctions exécutives dont les capacités de planification et de résolution de problème mais aussi l'orientation visuo-spatiale, les fonctions mnésiques et attentionnelles (Farias et al. 2003). La difficulté consiste alors à cibler la rééducation sur une fonction exécutive précise (l'inhibition par exemple).

Ces deux approches - les outils plus traditionnels et la RV - ne sont donc pas mutuellement exclusives mais bien complémentaires. Tandis que les outils classiques permettent de rééduquer les processus cognitifs de base, la rééducation plus fonctionnelle en RV permet de travailler sur l'impact de ces troubles dans des situations proches du réel. Cette complémentarité devrait permettre aux neuropsychologues de combiner les deux approches en fonction des impératifs du moment : les déficits cognitifs, bien entendu, mais aussi la situation socio-professionnelle du patient, son état émotionnel, sa situation familiale, sa motivation, son degré de nosognosie, etc. Au sein même des applications de RV, aucune solution n'est univoque. Il incombera au neuropsychologue de faire un choix pertinent parmi l'ensemble des dispositifs, environnements virtuels et exercices proposés en fonction des spécificités de la rééducation à mettre en place comme, par exemple : les capacités lésées et préservées du patient, l'objectif poursuivi et les contraintes du service (lieux, informatique, budget etc.) (Klinger, Marié and Fuchs 2006).

Bibliographie

- ARNS, L. AND M. CERNEY. The relationship between age and incidence of cybersickness among immersive environment users. In *IEEE Conference on Virtual Reality*. 2005, vol. 267–8.
- BAUM, C. M., L. T. CONNOR, T. MORRISON, M. HAHN, et al. Reliability, validity, and clinical utility of the Executive Function Performance Test: A measure of executive function in a sample of people with stroke. *American Journal of Occupational Therapy*, 2008, 62(4), 446-455.
- BAUS, O. AND S. BOUCHARD Moving from virtual reality exposure-based therapy to augmented reality exposure-based therapy: a review. *Front Hum Neurosci*, 2014, 8, 112.
- BOHIL, C. J., B. ALICEA AND F. A. BIOCCA Virtual reality in neuroscience research and therapy. *Nat Rev Neurosci*, Dec 2011, 12(12), 752-762.
- CAMARA LOPEZ, M. AND A. CLEEREMANS. Intérêts et limites de la réalité virtuelle en revalidation neuropsychologique. In X. SERON AND M. VAN DER LINDEN eds. *Traité de Neuropsychologie Clinique de l'adulte - Tome 2 (2nd édition)*. Marseille: Solal, 2016.
- CHAYTOR, N. AND M. SCHMITTER-EDGEcombe The ecological validity of neuropsychological tests: a review of the literature on everyday cognitive skills. *Neuropsychol Rev*, Dec 2003, 13(4), 181-197.
- CHERNIACK, E. P. Not just fun and games: applications of virtual reality in the identification and rehabilitation of cognitive disorders of the elderly. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2011, 6(4), 283-289.
- CIPRESSO, P., S. SERINO, F. PALLAVICINI, A. GAGGIOLI, et al. NeuroVirtual 3D: A Multiplatform 3D Simulation System for Application in Psychology and Neuro-Rehabilitation. In M. MA, L.C. JAIN AND P. ANDERSON eds. *Virtual, Augmented Reality and Serious Games for Healthcare 1*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014, vol. 68, p. 275-286.
- DEHN, L. B., L. KATER, M. PIEFKE, M. BOTSCH, et al. Training in a comprehensive everyday-like virtual reality environment compared to computerized cognitive training for patients with depression. *Computers in Human Behavior*, 2018, 79, 40-52.
- DORES, A. R., I. P. CARVALHO, F. BARBOSA, I. ALMEIDA, et al. Computer-Assisted Rehabilitation Program–Virtual Reality (CARP-VR): A Program for Cognitive Rehabilitation of Executive Dysfunction. In G.D. PUTNIK AND M.M. CRUZ-CUNHA eds. *Virtual and networked organizations, emergent technologies and tools*. Berlin Heidelberg: Springer, 2012, p. 90-100.
- EINSTEIN, G. O. AND M. A. MCDANIEL Normal aging and prospective memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 1990, 16(4), 717-726.
- FARIAS, S. T., E. HARRELL, C. NEUMANN AND A. HOUTZ The relationship between neuropsychological performance and daily functioning in individuals with Alzheimer's disease: ecological validity of neuropsychological tests. *Arch Clin Neuropsychol*, Aug 2003, 18(6), 655-672.
- FORDELL, H., K. BODIN, A. EKLUND AND J. MALM RehAtt–scanning training for neglect enhanced by multi-sensory stimulation in Virtual Reality. *Topics in stroke rehabilitation*, 2016, 23(3), 191-199.
- FRANZEN, M. D. AND K. L. WILHELM. Conceptual foundations of ecological validity in neuropsychological assessment. In R.J. SBORDONE AND C.J. LONG eds. *Ecological validity of neuropsychological testing*. Delray Beach, FL, England: Gr Press/St Lucie Press, 1996, p. 91-112.
- FUCHS, P. AND G. MOREAU Le traité de la réalité virtuelle. volume 2 : Création des environnements virtuels & Applications. Edtion ed. Paris (France): Les Presses de l'Ecole des mines, 2003.
- GAMITO, P., J. OLIVEIRA, N. SANTOS, J. PACHECO, et al. Virtual exercises to promote cognitive recovery in stroke patients: the comparison between head mounted displays versus screen

exposure methods. *International Journal on Disability and Human Development*, 2014, 13(3), 337-342.

GARCÍA-BETANCES, R. I., M. T. A. WALDMEYER, G. FICO AND M. F. CABRERA-UMPIÉRREZ A succinct overview of virtual reality technology use in Alzheimer's disease. *Frontiers in aging neuroscience*, 2015, 7.

GHINEA, G. AND O. A. ADEMOYE Olfaction-enhanced multimedia: perspectives and challenges. *Multimedia Tools and Applications*, 2011, 55(3), 601-626.

GREWE, P., A. KOHSIK, D. FLENTGE, E. DYCK, et al. Learning real-life cognitive abilities in a novel 360-virtual reality supermarket: a neuropsychological study of healthy participants and patients with epilepsy. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 2013, 10(1), 1.

HECHT, D., M. REINER AND G. HALEVY Multimodal virtual environments: response times, attention, and presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2006, 15(5), 515-523.

HOFFMAN, H., J. GROEN, S. ROUSSEAU, A. HOLLANDER, et al. Tactile augmentation: Enhancing presence in virtual reality with tactile feedback from real objects. In *meeting of the American Psychological Society*. San Francisco, USA, 1996.

JACOBY, M., S. AVERBUCH, Y. SACHAR, P. L. WEISS, et al. Effectiveness of executive functions training within a virtual supermarket for adults with traumatic brain injury. In *Virtual Rehabilitation (ICVR), 2011 International Conference on*. IEEE, 2011, p. 1-7.

KATZ, N., H. RING, Y. NAVEH, R. KIZONY, et al. Interactive virtual environment training for safe street crossing of right hemisphere stroke patients with unilateral spatial neglect. *Disabil Rehabil*, Oct 30 2005, 27(20), 1235-1243.

KERKHOFF, G. AND T. SCHENK Rehabilitation of neglect: an update. *Neuropsychologia*, May 2012, 50(6), 1072-1079.

KLINGER, E. AND P. A. JOSEPH. Rééducation des troubles cognitifs par réalité virtuelle. In J. FROGER AND J. PÉLISSIER eds. *Rééducation instrumentalisée après cérébrolésion vasculaire*. Paris: Masson, 2008, p. 149-165.

KLINGER, E., R.-M. MARIÉ AND P. FUCHS Réalité virtuelle et sciences cognitives: Applications en psychiatrie et neuropsychologie. In *Cognito-Cahiers Romains de Sciences Cognitives*, 2006, 3(2), 1-31.

LOMBARD, M. AND T. DITTON At the heart of it all: The concept of presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 1997, 3(2), 20.

MITROVIC, A., M. MATHEWS, S. OHLSSON, J. HOLLAND, et al. Computer-Based Post-Stroke Rehabilitation of Prospective Memory. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, 2016, 5(2), 204-214.

OGOURTSOVA, T., W. SOUZA SILVA, P. S. ARCHAMBAULT AND A. LAMONTAGNE Virtual reality treatment and assessments for post-stroke unilateral spatial neglect: A systematic literature review. *Neuropsychological Rehabilitation*, 2017, 27(3), 409-454.

PARAVATI, G., V. M. SPATARO, F. LAMBERTI, A. SANNA, et al. A customizable virtual reality framework for the rehabilitation of cognitive functions. In *Recent Advances in Technologies for Inclusive Well-Being*. Springer, 2017, p. 61-85.

PARSEY, C. M. AND M. SCHMITTER-EDGEcombe Applications of technology in neuropsychological assessment. *Clin Neuropsychol*, 2013, 27(8), 1328-1361.

PEDROLI, E., S. SERINO, P. CIPRESSO, F. PALLAVICINI, et al. Assessment and rehabilitation of neglect using virtual reality: a systematic review. *Front Behav Neurosci*, 2015, 9, 226.

PICARD, L., M. ABRAM, E. ORRIOLS AND P. PIOLINO Virtual reality as an ecologically valid tool for assessing multifaceted episodic memory in children and adolescents. *International Journal of Behavioral Development*, 2015, 1-9.

REPETTO, C., S. SERINO, M. MACEDONIA AND G. RIVA Virtual reality as an embodied tool to enhance episodic memory in elderly. *Frontiers in psychology*, 2016, 7(1839), 1-4.

RIVA, G., A. GAGGIOLI, A. GRASSI, S. RASPELLI, et al. NeuroVR 2-A free virtual reality platform for the assessment and treatment in behavioral health care. In *MMVR*. 2011, vol. 163, p. 493-495.

RIZZO, A. A. AND G. J. KIM A SWOT analysis of the field of virtual reality rehabilitation and therapy. *Presence*, 2005, 14(2), 119-146.

ROSA, P. J., C. SOUSA, B. FAUSTINO, F. FEITEIRA, et al. The effect of virtual reality-based serious games in cognitive interventions: a meta-analysis study. In *REHAB '16*. Lisbon, Portugal: ACM, 2016, p. 113-116.

SAUZÉON, H., B. N'KAOUA, P. ARVIND PALA, M. TAILLADE, et al. Age and active navigation effects on episodic memory: A virtual reality study. *British Journal of Psychology*, 2015, 107(1), 72-94.

SCHNEIDER, E. F., A. LANG, M. SHIN AND S. D. BRADLEY Death with a Story : How Story Impacts Emotional, Motivational, and Physiological Responses to First-Person Shooter Video Games. *Human communication research*, 2004, 30(3), 361-375.

SCHULTHEIS, M. T. AND A. A. RIZZO The application of virtual reality technology in rehabilitation. *Rehabilitation psychology*, 2001, 46(3), 296.

SERON, X. La revalidation neuropsychologique: réflexions sur les tendances actuelles. In S. ADAM, P. ALLAIN, G. AUBIN AND F. COYETTE eds. *Actualités en rééducation neuropsychologique: Etudes de cas*. Marseille: Solal éditeur, 2009, p. 9-28.

SHERIDAN, T. B. Musings on telepresence and virtual presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1992, 1(1), 120-126.

SHIN, H. AND K. KIM Virtual reality for cognitive rehabilitation after brain injury: a systematic review. *Journal of physical therapy science*, 2015, 27(9), 2999.

SLATER, M. AND M. V. SANCHEZ-VIVES Enhancing our lives with immersive virtual reality. *Frontiers in Robotics and AI*, 2016, 3(74), 1-47.

SOHLBERG, M. M. AND C. A. MATEER *Introduction to cognitive rehabilitation: Theory and practice*. Edtion ed. New York, NY, US: Guilford Press, 1989. ISBN 0898627389.

STANDEN, P. J., C. CAMM, S. BATTERSBY, D. J. BROWN, et al. An evaluation of the Wii Nunchuk as an alternative assistive device for people with intellectual and physical disabilities using switch controlled software. *Computers & Education*, 2011, 56(1), 2-10.

SUSI, T., M. JOHANNESSON AND P. BACKLUND Serious Games – An Overview. Technical Report HS-IKI-TR-07-001, School of Humanities and Informatics, University of Skövde, Sweden, 2007, 1-28.

TEO, W.-P., M. MUTHALIB, S. YAMIN, A. M. HENDY, et al. Does a combination of virtual reality, neuromodulation and neuroimaging provide a comprehensive platform for neurorehabilitation?—A narrative review of the literature. *Frontiers in human neuroscience*, 2016, 10(284), 1-15.

TIERI, G., G. MORONE, S. PAOLUCCI AND M. IOSA Virtual reality in cognitive and motor rehabilitation: facts, fiction and fallacies. *Expert review of medical devices*, 2018, 1-11.

TOGLIA, J. The Dynamic interactional model of cognition in cognitive rehabilitation. In N. KATZ ed. *Cognition, occupation and participation along the life span: Neuroscience, neurorehabilitation and models for intervention in occupational therapy*. Bethesda, MD: AOTA Press, 2011, p. 161-202.

TULVING E AND H. MARKOWITSCH Episodic and declarative memory: role of the hippocampus. *Hippocampus*, 1998, 8, 198–204.

WILSON, B. A. Towards a comprehensive model of cognitive rehabilitation. *Neuropsychological Rehabilitation*, 2002, 12(2), 97-110.

