

Neuropsychologie et technologies numériques

Neuropsychology and digital technologies

Maxime Jollivet¹, Jonathan Fortier¹,
Jérémy Besnard¹, Didier Le Gall^{1,2},
Philippe Allain^{1,2}

¹ Laboratoire de psychologie des Pays
de la Loire (EA 4638), Université d'Angers,
Maison de la recherche Germaine-Tillion,
5 bis, boulevard Lavoisier,
49045 Angers Cedex 01, France

² Unité de neuropsychologie,
Département de neurologie,
Centre hospitalier universitaire d'Angers,
4, rue Larrey, 49933 Angers, France
<philippe.allain@univ-angers.fr>

Pour citer cet article : Jollivet M, Fortier
J, Besnard J, Le Gall D, Allain P. Neu-
ropsychologie et technologies numériques.
Rev Neuropsychol 2018 ; 10 (1) : 69-81
doi:10.1684/nrp.2018.0447

Résumé

Les technologies du numérique ont fait des progrès particulièrement spectaculaires ces dernières décennies, mettant à la disposition des cliniciens de nouveaux outils pour l'évaluation et la revalidation neuropsychologique (logiciels d'évaluation et de revalidation neuropsychologique, réalité virtuelle, aides externes numériques, télé-neuropsychologie), susceptibles de faire évoluer considérablement leurs pratiques. Cet article propose une réflexion générale, critique et illustrée, centrée sur l'état de l'adaptation technologique dans le champ de la neuropsychologie clinique.

Mots clés : neuropsychologie, nouvelles technologies, évaluation, revalidation

Abstract

Digital technologies have made particularly spectacular progress in recent decades, providing clinicians with new tools for neuropsychological assessment and revalidation (software for neuropsychological assessment and revalidation, virtual reality, digital external aids, tele-neuropsychology), which can significantly change their practices. This article proposes a general, critical and illustrated reflection centred on the state of technological adaptation in the field of clinical neuropsychology. To do this, we will focus on the interest and limitations of traditional clinical neuropsychology (Neuropsychology 1.0), computer-assisted neuropsychology (Neuropsychology 2.0), neuropsychology based on virtual environments (Neuropsychology 3.0), and tele-neuropsychology. This reflection raises a number of scientific, technical, practical and ethical questions that we hope will provoke debate within our community.

Key words: neuropsychology • new technologies • assessment • rehabilitation

■ Introduction

S'arrêter, à l'occasion des 40 ans de la Société de neuropsychologie de langue française, sur la thématique de la neuropsychologie à l'ère du numérique et des nouvelles technologies paraît utile, les travaux sur l'évaluation et la revalidation des troubles cognitifs via les outils numériques (logiciels, environnements virtuels) étant en très forte augmentation depuis les années 1990. Comme l'indique la *figure 1*, les premières publications sur l'évaluation et la revalidation neuropsychologique *via* des tâches informatisées datent de 1969. Celles sur l'évaluation et la revalidation

neuropsychologique par système de réalité virtuelle (RV) datent de 1993. La *figure 1* montre aussi que l'intérêt pour l'utilisation des nouvelles technologies en évaluation ou en revalidation neuropsychologique ne semble pas être le même. L'essor des tâches informatisées, et celui de la réalité virtuelle, sont également dissociables. Sur cette figure, le cumul des publications est principalement influencé par les travaux sur l'évaluation informatisée jusque dans les années 2010. Ensuite, le cumul est influencé par l'accroissement des publications en revalidation informatisée, en évaluation et revalidation en RV. Ces données suggèrent une stagnation de l'intérêt pour l'évaluation informatisée et, au contraire, une augmentation de l'intérêt pour l'utilisation de la RV et, de manière générale, un intérêt accru pour la revalidation neuropsychologique via les outils du numérique.

Correspondance :
P. Allain

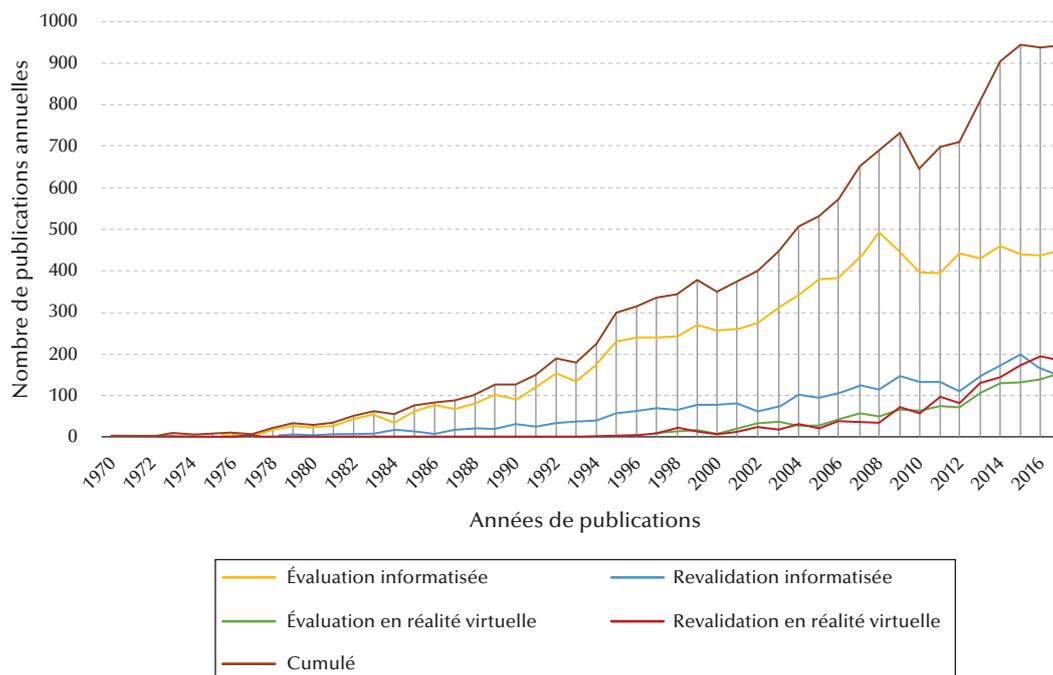


Figure 1. Publications autour de la “Neuropsychologie numérique”.

Note. La méthode a consisté à recenser le nombre de publications annuelles en cherchant sur la base de données PubMed, à la date du 10/11/2017, à l’aide des termes suivants : Évaluation informatisée (“computerized[All Fields] AND (“Assessment[Journal] OR “assessment”[All Fields])” ; Rééducation informatisée (“computerized[All Fields] AND (“rehabilitation”[Subheading] OR “rehabilitation”[All Fields] OR “rehabilitation”[MeSH Terms])” ; Évaluation en Réalité Virtuelle (“Virtual Real”[Journal] OR “Int] Virtual Real”[Journal] OR (“virtual”[All Fields] AND “reality”[All Fields]) OR “virtual reality”[All Fields]) AND (“Assessment”[Journal] OR “assessment”[All Fields])” ; Rééducation en Réalité Virtuelle (“Virtual Real”[Journal] OR “Int] Virtual Real”[Journal] OR (“virtual”[All Fields] AND “reality”[All Fields]) OR “virtual reality”[All Fields]) AND (“rehabilitation”[Subheading] OR “rehabilitation”[All Fields] OR “rehabilitation”[MeSH Terms])”.

Les ouvrages de synthèse et les ouvrages collectifs autour de ces thématiques se multiplient également. Nous citerons en particulier ceux de Parsons [1] et Kane et Parsons [2] qui ont très clairement appelé la neuropsychologie clinique à faire évoluer ses pratiques d’évaluation et de réévaluation en prenant davantage appui sur les technologies du numérique qui, selon ces auteurs, ont connu des progrès spectaculaires ces dernières décennies.

Le constat dressé dans ces 2 ouvrages est sévère : Parsons [1] déclare ainsi : « Alors que la neuropsychologie clinique insiste sur son rôle en tant que science, sa technologie ne progresse pas au même rythme que dans les autres domaines des neurosciences cliniques ». Dans le même ordre d’idée, Kane et Parsons [2] affirment que « La neuropsychologie en tant que domaine, a été lente à adopter et exploiter le potentiel offert par la technologie pour rendre le processus d’évaluation plus efficace ou pour développer de nouvelles approches qui améliorent l’évaluation de la cognition ».

Ces remarques signifient-elles pour autant qu’il faille s’engouffrer rapidement et en force dans l’utilisation des nouvelles technologies pour tenter de combler ce qui semble être une « fracture numérique » en

neuropsychologie ? Probablement pas, comme l’ont justement récemment pointé Collette, Amieva et Eustache [3] qui, s’interrogeant sur les usages du numérique en neuropsychologie, invitent à des forums, workshops ou réunions pour débattre et prendre position.

Dans ce contexte, cet article propose une réflexion générale, critique et illustrée, centrée sur l’état de l’adaptation technologique dans le champ des pratiques neuropsychologiques (évaluation et réévaluation). Pour ce faire, nous suivrons les propositions de Parsons [1] qui, dans la logique des neuropsychologies 1.0, 2.0 et 3.0 de Bilder [4], évoque :

- l’évaluation et la réévaluation neuropsychologique 1.0 qui s’appuient sur les tests, exercices et aides cognitives au format « papier-crayon » ;
- l’évaluation et la réévaluation neuropsychologique 2.0 qui utilisent les tests informatisés, les logiciels de réévaluation et les aides cognitives électro-nerveuses ;
- l’évaluation et la réévaluation neuropsychologique 3.0 utilisant la réalité virtuelle. Nous nous arrêterons enfin sur une pratique quasi inexistante en France, la télé-neuropsychologie.

■ Neuropsychologie 1.0

Pour Bilders [4], la neuropsychologie 1.0 s'inscrit dans le prolongement de la neuropsychologie historique. Elle a vu des cliniciens, tels que Luria [5] ou Broca [6], se centrer sur des localisations cérébrales pour décrire différents tableaux cliniques (syndromes frontaux, aphasie de Broca). Elle a permis le développement d'évaluations neuropsychologiques à orientation qualitative, utilisant d'abord des tests dérivés des pratiques cliniques neurologiques et/ou des tests psychologiques peu normés, voire sans normes. La neuropsychologie 1.0 a progressivement évolué vers une approche plus quantitative, soit en utilisant des outils issus de la culture psychométrique de type échelle d'intelligence de Wechsler, soit en développant ses propres outils comme la Batterie neuropsychologique de Halstead-Reitan ; tout cela à partir des années 1950.

La démarche a permis de remédier aux critiques de l'époque, portant notamment sur le manque de standardisation des procédures d'évaluation, le manque de clarté des procédures d'administration et des cotations des tests, l'absence de prise en compte de la variabilité interindividuelle et l'absence de normes [1]. La démarche a aussi permis et permet encore le développement de procédures d'évaluation très spécialisées (tests, questionnaires), visant la mesure fidèle, valide, sensible et spécifique des différents types de déficits neuropsychologiques observables après une atteinte cérébrale (déficits des fonctions instrumentales, déficits des fonctions complexes, déficits psycho-affectifs). Dans la sphère francophone, l'important travail du Groupe de réflexion sur les évaluations cognitives (Greco) et de ses commissions est à souligner. Ce travail a notamment permis la création ou l'adaptation d'épreuves de mémoire épisodique (Commission Gremem) et exécutives (Commission Grefex).

La neuropsychologie 1.0 peut donc être considérée, sur le plan de l'évaluation, comme centrée sur les tests/questionnaires « papier-crayon » classiques. Sur le plan de la revalidation, elle a permis le développement de programmes « papier-crayon » holistiques [7], centrés sur des composantes cognitives particulières [8], utilisant parfois des aides externes de type carnet mémoire [9]. La neuropsychologie 1.0 domine encore très largement les pratiques neuropsychologiques alors qu'elle présente, pour certains auteurs [1,2], bien des limites. Les deux principales mises en avant dans les ouvrages de synthèse mentionnés précédemment [1, 2] sont le peu de progrès effectués dans l'adoption des technologies du numérique et le manque de validité écologique des outils qu'elle utilise. En neuropsychologie, la notion de validité écologique renvoie à la capacité des outils utilisés à prédire le comportement du patient en vie quotidienne. Pour Franzen et Wilhelm [10], deux exigences sont nécessaires pour qu'un outil soit considéré comme écologiquement valide. Une exigence de « verisimilitude » qui renvoie au caractère naturel du test/exercice proposé et à sa capacité à simuler les contraintes d'une tâche de la vie réelle et une exigence de « veridicality » qui pose la

question de savoir si la performance à un test/exercice est prédictive du fonctionnement au quotidien.

Pour Parsons [1], « l'industrie des tests standardisés » n'a apporté que des modifications cosmétiques à des outils déjà utilisés au siècle dernier, portant essentiellement sur les propriétés psychométriques (améliorations ou ajouts de sous-tests, mise à jour de normes, etc.) de ces outils. Cela rejoint les réflexions de Sternberg qui, en 1997 [11], pointait déjà les différences entre le peu de progrès effectués en évaluation neuropsychologique avec des échelles du type de celles développées par Wechsler et ceux effectués dans d'autres domaines de la santé comme celui de l'imagerie cérébrale/médicale. Sternberg [11] considérait que les neuropsychologues travaillaient avec des outils datant de l'invention de la télé noir et blanc.

La question est aussi de savoir quel intérêt présente encore aujourd'hui et présentera demain les outils d'évaluation « papier-crayon » que nous utilisons ? Ceci à l'heure où les outils et les technologies du numérique (WEB, tablettes, smartphones, etc.) envahissent nos vies quotidiennes, transformant profondément nos modes de relations aux autres (mise en réseau, y compris à un niveau planétaire, des individus), nos modes de communication (courriels, réseaux sociaux, etc.), nos modes d'accès à l'information (décentralisation dans la circulation des idées et de l'information) et nos habitudes de vie, y compris nos comportements cognitifs. En effet, plus les capacités de mémoire de nos téléphones augmentent, moins nous avons besoin de mémoriser des numéros de téléphone, des plannings. Plus nos téléphones nous permettent de nous repérer, moins nous faisons appel à nos capacités de repérage spatial. Nous pourrions ici démultiplier les exemples de ce type montrant que les technologies modifient nos habitudes cognitives. Vie sociale et vie privée s'organisent désormais autour des outils numériques. Ainsi, en France par exemple, selon le Crédoc, en 2015, 92 % des Français possédaient un téléphone mobile, 80 % un ordinateur et 83 % un accès internet. Le taux d'équipement en tablettes tactiles et smartphones croît très vite, passant, de 2012 à 2015, de 8 % à 35 % pour les premières et de 28 % à 58 % pour les seconds. Les jeunes d'aujourd'hui, les patients de demain, paraissent davantage concernés par la culture numérique, regardant moins la télévision que leurs aînés, mais passant leur temps à surfer sur internet *via* leur smartphone.

Sur le manque de validité écologique des tests neuropsychologiques classiques, la critique n'est pas non plus nouvelle. Elle a déjà été pointée par Azouvi *et al.* [12], il y a une vingtaine d'années. Pour ces auteurs, les outils neuropsychologiques classiques, largement utilisés en évaluation clinique, n'ont pas fait la démonstration d'une adéquation entre ce qu'ils mesurent et le handicap fonctionnel, tel qu'il peut survenir dans le quotidien du patient. La dissociation entre cognition préservée et trouble des conduites complexes rapportée par Eslinger et Damasio [13] à propos du patient EVR constitue probablement l'illustration la plus célèbre de ce problème. Le même constat a été fait en revalidation neuropsychologique par des auteurs tels que

Rizzo et Kim [14]. Selon Seron [15], il y aurait là une piste sérieuse pour expliquer pourquoi les transferts des bénéfices des traitements aux situations de vie courante sont limités.

Cela dit, on ne peut pas dire que les neuropsychologues cliniciens ne se soient pas préoccupés du problème de validité écologique des épreuves qu'ils utilisent. Dans les années 1990-2000, ils ont en effet développé un ensemble d'outils visant à simuler et évaluer des activités de la vie quotidienne ou à les interroger. Ce, soit sous format « papier-crayon » avec des tests tel le *Test of Everyday Attention*, soit sous format « mise en situation », avec des tests tel le *Multiple Errands Test*, soit encore sous format questionnaire, avec un outil tel que le *Questionnaire d'auto-évaluation de la mémoire*. Beaucoup de travaux ont montré l'intérêt de ces tests/questionnaires en clinique neuropsychologique. Néanmoins, ils ne constituent pas la solution idéale, et possèdent, à plusieurs égards, les mêmes limites que les tests traditionnels. Nous retiendrons ici que les tests écologiques restent souvent administrés dans un contexte contrôlé bureau de l'évaluateur, ne permettant pas l'introduction d'imprévus et/ou de distracteurs comme dans la vie courante. Nous retiendrons que les mises en situation nécessitent parfois de lourdes procédures (autorisation administrative de sortie, plusieurs thérapeutes), sont chronophages et qu'elles ont une validité de mesure parfois limitée (le *Multiple Errands Test* se déroule dans un centre commercial réel au contexte changeant). Enfin, nous retiendrons que les questionnaires n'échappent pas aux biais des mesures subjectives (prise de conscience imparfaite chez les patients et/ou sous-estimation plus ou moins volontaire du handicap chez un proche).

■ Neuropsychologie 2.0

La neuropsychologie 2.0 nous semble constituer une tentative de réponse intéressante au constat selon lequel peu de progrès ont été effectués dans l'adoption des technologies du numérique en neuropsychologie clinique. Elle met à la disposition des cliniciens, depuis les années 1970, un nombre croissant d'outils numériques pour l'évaluation et la revalidation neuropsychologique ; ce, grâce à différents types de supports comme les ordinateurs de bureau, les ordinateurs portables, les tablettes numériques, etc.

Les premiers tests informatiques sont apparus dans les années 1970. Il s'agissait principalement de versions informatisées de tests classiques tels le *Peabody Picture Vocabulary Test*, les *Progressives Matrices de Raven*. On montrait à l'époque que ces outils avaient une bonne fidélité *test-retest*, sans différence notable entre administration classique et administration assistée par ordinateur [16].

Dans les années 1980, la neuropsychologie nord-américaine s'est mise à davantage utiliser l'évaluation neuropsychologique informatisée, dans les milieux militaires et sportifs en particulier. L'objectif était de détecter d'éventuelles séquelles cognitives post-contusions légères, avec des évaluations avant, après et de suivi. Pour ce faire,

de nouveaux outils visant la détection de troubles cognitifs légers ont été créés dont les batteries ANAM (*Automated Neuropsychological Assessment Metrics*) [17] et ImpACT (*Immediate Post-Concussion Assessment and Cognitive Testing*) [18] mesurant l'attention, la concentration, la vitesse de traitement, le temps de réaction, la mémoire, les habiletés visuo-spatiales, la prise de décision.

Au cours des années 1990, les développeurs de tests informatiques ont poursuivi l'édition de versions numériques (souvent révisées) de tests classiques en y ajoutant des systèmes de cotation et de génération de profils automatiques avec modules d'interprétation. Nous pouvons citer les outils suivants : le *Wisconsin Card Sorting Test*, le *California Verbal Learning Test-Second Edition*, le *Delis-Kaplan Executive Function System*, la *Neuropsychological Assessment Battery*, la *Wechsler Adult Intelligence Scale-Fourth Edition* et la *Wechsler Memory Scale-Fourth Edition*.

Le début des années 2000 a aussi vu les évaluations neuropsychologiques informatisées se développer auprès de différents types de patients cérébro-lésés à partir d'outils de type CANTAB (*Cambridge Neurological Test Automated Battery*). La CANTAB est certainement la batterie d'évaluation neuropsychologique numérisée la plus utilisée dans le monde. Selon son éditeur, elle serait référencée comme outil d'évaluation dans plus de 2000 articles scientifiques. Elle serait également citée plus de 100 000 fois. Cette batterie, qui évalue les fonctions exécutives, la mémoire, l'attention et la cognition sociale, a été traduite dans plus de 30 langues, dont le français.

Le début des années 2000 a aussi vu le développement très rapide d'outils permettant de réaliser des évaluations par Internet, soit en transformant des outils « papier-crayon », soit en développant de nouveaux outils. Plusieurs portails permettant des évaluations neuropsychologiques payantes sont aujourd'hui accessibles. Nous pouvons citer *Pearson's Q-Global System*, PAR iConnect, ou encore, accessible en langue française, CogniFit. Chacun d'eux propose un ensemble de tests et d'échelles accessibles en ligne parfois destinés aux professionnels ou parfois accessibles au public. Par exemple, pour les professionnels du secteur de la santé, *Pearson's Q-Global System* propose 38 tests ou échelles, dont le *Basic Achievement Skills Inventory* (BASI), la *Beck Anxiety Inventory* (BAI), la *Wechsler Intelligence Scale for Children-Fifth Edition* (WISC-V). Pour le grand public, le portail CogniFit créé en 1999 par Breznitz, propose une batterie d'évaluation cognitive générale (*Cognitive Assessment Battery-CAB*, 40 minutes), explorant les domaines de la mémoire, de l'attention, de la perception de la coordination et du raisonnement. Il propose également plusieurs batteries d'évaluations neuropsychologiques ciblant des conditions particulières (dépression, maladie de Parkinson, dyscalculie, dyslexie, trouble déficitaire de l'attention avec hyperactivité).

De très nombreuses revues de la littérature, ont pointé, depuis les années 1980, les avantages et les inconvénients des évaluations neuropsychologiques informatisées.

Parsons [1] a très récemment proposé la synthèse rapportée dans le *tableau 1*, qui montre que la liste des avantages a beau être plus longue, les logiciels d'évaluation présentent également un certain nombre d'inconvénients. De plus, leur capacité à prévoir des déficits fonctionnels est très faible selon Parsons [1]. À titre d'exemple, nous pouvons évoquer le travail de Prouteau *et al.* [19] qui n'ont pas montré de lien entre les scores obtenus à la CANTAB et la plainte cognitive subjective chez des sujets schizophrènes. Dans le même ordre d'idée, Barkley et Murphy [20] n'ont pas trouvé de lien entre le score au CPT informatisé et la plainte des patients concernant les troubles exécutifs dans les activités quotidiennes.

Côté revalidation, les outils à disposition des cliniciens, tels que les logiciels d'entraînement des fonctions cognitives (souvent accessibles en ligne) ont aussi proliféré, en particulier ces dernières années. Le *tableau 2* propose un listing non exhaustif de logiciels de stimulation/entraînement/revalidation en précisant les fonctions cognitives qu'ils permettent de travailler.

Arrêtons-nous sur l'un d'entre eux : Cogmed. Cet outil de revalidation (distribué par PEARSON) est centré sur la mémoire de travail. Le programme offre de nombreuses possibilités dont un ajustement dynamique de la difficulté en temps réel, une connexion à distance sans besoin de praticien, une revalidation de la mémoire de travail auditivo-verbale et visuo-spatiale utilisable pour des patients de 4 ans. Il se divise en fait en 3 sous-programmes suivant l'âge (préscolaire, scolaire, adulte). La littérature scientifique s'intéressant à l'efficacité de ce programme d'entraînement informatisée est importante avec plus de 200 publications en 15 ans. Cette littérature montre une amélioration de la mémoire de travail dans des tâches similaires, un transfert à des tâches de mémoire verbale et visuo-spatiales proches, sans transfert à des tâches plus éloignées (compréhension, résolution de problèmes arithmétiques, *etc.*), comme le souligne l'importante méta-analyse de Melby-Lervag *et al.* [21].

L'industrie du numérique a aussi permis de faire évoluer significativement les aides externes. Par exemple, les carnets mémoires et les listes de tâches sont aujourd'hui souvent remplacés par des smartphones et leurs fonctions/applications (messagerie à distance, alarme, SMS, agenda, système de navigation, *etc.*). Beaucoup d'études, dont en particulier la revue systématique et la méta-analyse de Jamieson *et al.* [22], ont montré l'intérêt des prothèses cognitives numériques pour compenser les déficits cognitifs.

La neuropsychologie 2.0 a donc permis d'intégrer le numérique dans les pratiques d'évaluation et de revalidation neuropsychologique, permettant de répondre à l'une des critiques faites à la neuropsychologie 1.0. L'utilisation de logiciels pour l'évaluation neuropsychologique semble plus développée dans les pays anglo-saxons que dans les pays francophones, l'offre, en termes d'outils, étant plus réduite dans ces derniers et souvent centrée sur les mécanismes attentionnels. La neuropsychologie 2.0 n'a par

contre pas permis de répondre à la critique relative au manque de validité écologique des outils neuropsychologiques traditionnels. La neuropsychologie 3.0 semble plus en mesure de le faire.

■ Neuropsychologie 3.0

Pour Bilders [4], la neuropsychologie 3.0 est la neuropsychologie de demain. Elle devrait, selon lui, tirer bien meilleur parti des technologies de l'information et de la communication (TIC). Pour Parsons [1], Kane et Parsons [2] ou encore Edwards et Parsons [23], ces outils d'évaluation et de revalidation correspondent à ceux que permettent de développer les technologies de réalité virtuelle (RV).

La RV désigne un ensemble de techniques informatiques permettant de générer des environnements artificiels en 3 dimensions (réels ou imaginaires) dans lequel l'utilisateur est immergé, grâce à l'utilisation d'interfaces. Celles-ci lui permettent de recevoir des stimulations uni- ou multimodales (visuelles, auditives, tactiles, olfactives et/ou kinesthésiques) et de produire des actions en temps réel grâce à l'utilisation d'interfaces motrices. Pour You *et al.* (2005) [24], la RV permet de transposer la boucle « perception-cognition-action » dans un monde virtuel, contribuant à promouvoir une réponse cérébrale analogue à celle observée dans le monde réel.

Chaque plateforme/système de RV se compose d'une interface sensorielle pour la retranscription de l'environnement et des actions de l'utilisateur et d'une interface motrice pour l'interaction dans l'environnement virtuel (EV). Grâce à la sollicitation du système sensorimoteur, la RV « plonge » l'utilisateur dans l'EV, faisant naître chez lui un sentiment d'immersion. Le dispositif de présentation employé détermine le degré d'immersion des environnements qui peut être non immersif : simple écran d'ordinateur, semi-immersif : large écran proposant une meilleure qualité graphique ou immersif : emploi d'un visiocasque. Le degré d'immersion du système de RV détermine le degré de « présence ». Plus l'immersion est importante, plus le sujet est à même d'expérimenter la sensation d'être réellement dans cet espace virtuel et non plus dans l'environnement physique [25].

Plusieurs types d'interfaces peuvent être utilisées pour l'interaction avec l'EV :

- des interfaces de déplacement (joystick, volant, pédales, plateforme de locomotion, clavier, *etc.*) ;
- des interfaces de manipulation d'objets via des dispositifs haptiques (gants, bras à retour d'effort, souris, *etc.*).

Tous les sens peuvent être stimulés pendant l'immersion pour renforcer le sentiment de présence en diffusant par exemple des odeurs ou des bruits familiers. D'autres facteurs jouent également sur le sentiment de présence, parmi lesquels le temps d'immersion et l'interaction avec des avatars. Ce sentiment de présence est mesurable objectivement via des mesures physiologiques (conductance cutanée ou

Tableau 1. Avantages et inconvénients des évaluations neuropsychologiques informatisées selon Parsons [1].

Avantages	Inconvénients
<p>Passation (Présentation des stimuli)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Passation et cotation des tests mieux contrôlées • Durée de présentation des stimuli plus précise • Randomisation automatisée (stimuli et/ou essais) • Développement de formes alternatives et adaptation des tests plus faciles à mettre en œuvre • Possibilité de déterminer des seuils planchers et plafonds permettant d'interrompre le testing plus facilement • Présentation des tests en différentes langues plus facile • Possibilité de tester rapidement un grand nombre de sujets • Diminution des coûts en personnels et matériels • Évaluation possible sur différents types de supports (smartphones, ordinateurs portables, tablettes, etc.) 	<p>Passation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Des erreurs peuvent survenir durant la passation en raison de problèmes d'interaction software/hardware • Absence de flexibilité pendant les évaluations • Délivrance d'encouragements structurés réduite
<p>Enregistrement et cotation (réponses comportementales)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Précision accrue des mesures temporelles (latences, temps de réponse) • Possibilité d'intégrer et d'automatiser des algorithmes interprétatifs de type règles de décision statistiquement fiables permettant de pointer rapidement les déficits et les capacités préservées 	<p>Enregistrement et cotation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les réponses comportementales provenant de programmes informatisés pourraient ne pas être identiques ou similaires à celles enregistrées avec des tests « papier-crayon » • Les réponses relevées pourraient masquer des déficits apparents dans les tests classiques dans certaines populations (les patients autistes seraient plus performants face à un ordinateur) • Les évaluations informatisées pourraient solliciter les ressources cognitives jusqu'à des niveaux d'exigence plus importants que dans la vie quotidienne • Moins de possibilités d'enregistrer des réponses verbales
<p>Impact sur le participant</p> <ul style="list-style-type: none"> • Peut améliorer l'intérêt et l'engagement des participants • Peut diminuer l'influence de l'examineur sur les réponses • Peut améliorer l'accessibilité au testing neuropsychologique 	<p>Impact sur le participant</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les tests informatisés pourraient ne pas être des équivalents à leurs homologues « papier-crayon » au plan expérimental et psychométrique (validité) • Les attitudes négatives (crainte, anxiété) face aux ordinateurs sont fréquentes chez les individus peu exposés à la technologie : l'administration de tests informatisés pourrait altérer leur performance • Il est plus difficile d'apprécier le niveau d'efforts et de motivation
<p>Données normatives</p> <ul style="list-style-type: none"> • Facilitation de la collecte et de la comparaison de données normatives • Facilitation de l'exportation des données recueillies pour la réalisation d'analyses statistiques • Automatisation de l'exportation des données en recherche 	<p>Données normatives</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pas d'inconvénient relevé

Tableau 2. Exemples de logiciels de revalidation neuropsychologique.

Logiciel	Distributeur	Publics concernés	Coûts pour un an d'utilisation	Fonctions revalidées
Captain's Log	BrainTrain	Professionnels de santé	1200 €	Attention, concentration, mémoire visuo-spatiale, capacités visuo-motrices et conceptualisation
CogniFit	Cognifit	Tout public	180 €	Mémoire, attention et coordination visuo-manuelle
Cogmed	ECPA	Professionnels	900 €	Mémoire de travail
SOCIABLE	SingularLogic	Professionnels	Sur devis	Mémoire, fonctions exécutives, attention, raisonnement et orientation
Lumosity	LumosLab	Tout public	50 €	Mémoire, attention, vitesse de traitement, orientation spatiale, raisonnement et résolution de problèmes

rythme cardiaque) et/ou subjectivement via des questionnaires.

Sur le plan méthodologique, l'un des principaux intérêts de la RV en neuropsychologie est de permettre de conceptualiser des tâches suffisamment contrôlables pour permettre une réplification et une analyse fine des résultats via différents indicateurs (temps de latence, temps de réponse, nombre de bonnes réponses, nombre d'erreurs, types d'erreurs, hésitations, etc.). Un autre aspect de cette technologie est qu'elle est suffisamment complexe pour reproduire le plus fidèlement possible les exigences du milieu réel par le biais de stimulations multi sensorielles, ou encore par la présence de distracteurs.

D'après Standen et Brown [26], les tâches de RV permettent de sécuriser les situations d'évaluation/revalidation de compétences présentant des risques en situation réelle, comme conduire ou cuisiner. Le sujet peut commettre des erreurs sans s'exposer aux conséquences dangereuses de ses erreurs. De plus, cette technologie a un impact positif sur la motivation des patients, en particulier chez les jeunes [27].

En neuropsychologie, la RV comme outil, gagne en popularité permettant aux chercheurs et cliniciens de créer des environnements du quotidien très réalistes et contrôlés, de type salle de classe, centre commercial, supermarché, ville, appartement, permettant d'évaluer différents types de fonctions cognitives (voir le *tableau 3*). Elle semble concilier la validité expérimentale des épreuves de laboratoire et la validité écologique des évaluations de terrain, en permettant de conserver un contrôle expérimental important lors d'évaluations réalistes, susceptibles d'améliorer la validité écologique des outils d'évaluation et de revalidation neuropsychologiques [28-37].

Globalement, les travaux réalisés en RV montrent que les outils développés pour l'évaluation neuropsychologique sont sensibles, voire plus sensibles que les outils usuels, aux difficultés neuropsychologiques des patients (voir notamment la méta-analyse de Negut *et al.*) [38]. Ils ont une bonne validité écologique, avec des comparaisons tâche réelle/tâche virtuelle correspondant assez bien en termes de conclusion et/ou de corrélations statistiques. Ils peuvent être prédictifs des difficultés des patients en vie quotidienne.

À titre d'exemple, arrêtons-nous sur quelques travaux réalisés à Angers en RV dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire de Psychologie des Pays de Loire, le Laboratoire Angevin de recherche en ingénierie des systèmes et le CHU d'Angers. Ces travaux ont pour objectif de développer des EVs destinés à évaluer et réentraîner les activités de vie quotidienne (AVQs) chez des patients cérébrolésés. Dans cette logique, nous avons mis au point une cuisine virtuelle non immersive permettant de réaliser différentes activités, dont la préparation d'une tasse de café au lait sucré. Cet environnement et cette tâche ont été utilisés auprès d'une population de 24 patients atteints de maladie d'Alzheimer et 32 contrôles âgés sains appariés. Plus précisément, dans ce travail [39], nous avons comparé les performances obtenues lors de la réalisation de l'activité effectuée « en réel », à celles mesurées lors de la réalisation de la même activité en RV. Les erreurs de commission (erreurs de séquence, persévérations, substitutions, additions) et d'omissions (actions non réalisées) ont été retenues comme variables d'analyse. Nous avons également confronté les performances des patients en RV à une mesure des capacités fonctionnelles (IADL). Les résultats ont démontré une bonne sensibilité de la tâche de RV (les patients commettent plus d'erreurs que les contrôles

Tableau 3. Exemples d'études avec environnements d'évaluation utilisés et fonctions ciblées (liste non exhaustive d'études récentes).

Études	Types d'environnements virtuels	Fonctions cognitives évaluées
Nolin <i>et al.</i> (2016) [28]	Classe	Attention et inhibition
Canty <i>et al.</i> (2015) [29]	Centre commercial	Cognition sociale (théorie de l'esprit)
Cipresso <i>et al.</i> (2013) [30]	Supermarché	Fonctions exécutives
Klinger <i>et al.</i> (2009) [31]		
Henry <i>et al.</i> (2012) [32]	Appartement	Inhibition, mémoire épisodique
Sauzéon <i>et al.</i> (2016) [33]		
Lecouvey <i>et al.</i> (2017) [34]	Ville	Fonctions exécutives, mémoire épisodique, mémoire prospective
Plancher <i>et al.</i> (2012) [35]		
Jansari <i>et al.</i> (2014) [36]	Bureau d'affaires	Fonctions exécutives
Renison <i>et al.</i> (2012) [37]	Librairie	Fonctions exécutives, mémoire prospective

pour les variables prises en considération), mais également une bonne validité écologique de la tâche. Il existait en effet de fortes relations statistiques entre les scores d'erreurs en virtuel et en réel, ainsi qu'entre le score total d'erreurs en RV et le questionnaire IADL. Les analyses de régressions multiples, pour le groupe patient, montrent que les erreurs en virtuel sont les meilleurs prédicteurs des erreurs en réel. Elles montrent aussi que les erreurs en virtuel sont les meilleurs prédicteurs du score aux IADL. Nous avons obtenu des données similaires avec des patients traumatisés crâniens [40], confirmant que ce type d'outil présente un intérêt certain pour prédire les troubles fonctionnels.

Concernant la revalidation, la RV présente aussi de nombreux avantages. Elle permet, comme pour l'évaluation, de concevoir des exercices suffisamment contrôlés et suffisamment complexes pour reproduire le plus fidèlement possible les exigences du milieu réel. Elle permet également de répéter à loisir les situations d'entraînement, ce qui est intéressant, beaucoup de patients neurologiques ne présentant pas ou peu de troubles de mémoire procédurale. Enfin, elle permet un meilleur transfert des acquis aux situations réelles (stimuli communs aux environnements virtuels et réels).

L'une des illustrations les plus célèbres du transfert en rééducation avec utilisation de la RV est celle de l'étude de cas de Brooks *et al.* [41]. Les auteurs se sont intéressés à une patiente amnésique après un AVC, incapable de mémoriser des trajets à l'intérieur de son unité de soins, y compris ceux très fréquemment empruntés. Préalablement à l'expérience en RV, des tentatives de lui faire réaliser, en condition réelle, 10 trajets simples mettant en jeu des lieux où elle allait

souvent se sont avérées infructueuses. Dans une première expérience, la patiente a réalisé un entraînement à l'aide d'un EV transposant l'unité de soin dans une représentation 3D. L'entraînement en RV de 2 des 10 trajets (1 exercice 15 minutes/jour/3 semaines) a permis à la patiente de réaliser les 2 trajets en réel, ce qu'elle ne pouvait pas faire pour les trajets non entraînés. Dans une seconde expérience, afin de s'assurer de la spécificité de l'entraînement virtuel, 2 nouveaux trajets ont été entraînés : 1 en RV et 1 en réel. Après 2 semaines d'entraînement, la patiente maîtrisait le trajet entraîné en RV mais pas celui entraîné en environnement réel. Cette acquisition a été maintenue sans entraînement complémentaire. Les auteurs ont expliqué ce résultat en avançant l'idée que la RV permet de promouvoir, en environnement sans distracteur, des déplacements plus rapides sans provoquer de fatigue, rendant l'apprentissage plus efficace.

Sur cette base, nous avons développé une nouvelle cuisine virtuelle visant à améliorer l'autonomie dans une dizaine d'activités de cuisine. Les activités à travailler (faire un gâteau au chocolat, préparer un thé, etc.) peuvent être choisies par le patient et les interventions s'appuient sur l'estompage d'aide et l'apprentissage sans erreur. Les premières données publiées montrent [42], chez une patiente atteinte d'une maladie d'Alzheimer à un stade modéré, qu'un entraînement journalier d'une semaine permet d'améliorer significativement la performance dans les tâches de cuisine. Nous avons aussi observé un transfert au réel de l'amélioration ainsi qu'un maintien dans le temps.

Le *tableau 4*, inspiré de Camara Lopez et Cleere-mans [43], regroupe quelques travaux récents utilisant

Tableau 4. Synthèses de quelques études récentes portant sur la revalidation neuropsychologique en RV

Études	Fonction Cognitive	n	Matériel	Environnement	Design	Intensité	Comparaison	Conclusion
Claessen <i>et al.</i> (2015) [44]	Mémoire spatiale	6	Non-immersif (PC + Joystick)	Ville virtuelle	Études de cas Avant-Après	60 min/séance 4 fois semaine 4 semaines		Mise en application d'une stratégie de navigation alternative
Jacoby <i>et al.</i> (2011) [45]	Fonctions exécutives	12	Immersif	Supermarché virtuel	Essai contrôlé randomisé simple aveugle Avant-Après	45 min/séance 3-4 fois semaine 3 semaines	Classique/virtuel	Amélioration significative en RV
Katz <i>et al.</i> (2005) [46]	Négligence unilatérale	19	Non-immersif (PC + bouton poussoir)	Rue virtuelle	Essai contrôlé randomisé simple aveugle Avant-Après	45 min/séance 3-4 fois semaine 3 semaines	Classique/virtuel	Amélioration significative en RV
Yip et Man, (2013) [47]	Mémoire prospective	37	Non-immersif (PC + Joystick ou clavier)	Supermarché virtuel	Essai contrôlé randomisé simple aveugle Avant-Après	45 min/séance 2 fois semaine 6 semaines		Amélioration significative en RV

la RV comme support de revalidation. Nous avons rapporté les fonctions travaillées, le nombre de sujets recrutés, l'environnement utilisé, le design expérimental, l'intensité du programme proposé, les comparaisons effectuées et les principaux résultats obtenus [44-47].

En conclusion, la RV semble être un outil prometteur pour l'évaluation et la revalidation en neuropsychologie. Cela dit, des travaux restent à mener pour tirer des conclusions claires quant à son intérêt. Les études sont encore peu nombreuses, en particulier en revalidation. Dans les quelques travaux publiés en revalidation, les protocoles utilisés sont très hétérogènes, notamment en termes de délai post-lésionnel et de sévérité des pour ce qui concerne les patients et de durée d'exposition, de degré d'immersion et de type de dispositif employé pour ce qui concerne les technologies. Les travaux publiés souffrent aussi de limites méthodologiques, avec l'absence de groupe contrôle pour certains et de mesure du sentiment de présence. En évaluation, les procédures ne sont pas standardisées (consignes, matériel utilisé) et les épreuves proposées sont rarement normées.

Par ailleurs, beaucoup d'études comparant performance en RV et performance en réel pour des tâches similaires, dont les nôtres, montrent des scores plus faibles en RV, posant la question de savoir si la RV est plus sensible car plus écologique ou plus sensible car sollicitant davantage les ressources mentales. Cette question est importante car la manière dont la RV sollicite les ressources mentales pourrait varier selon la technologie d'immersion et d'interaction utilisée et selon le degré de familiarité aux nouvelles technologies, justifiant des recherches complémentaires sur l'ergonomie des situations. Dans la même logique, la correspondance environnement réel/environnement virtuel, aussi parfaite soit-elle, reste factice, ne permettant pas de prendre en compte tous les aspects du réel, comme le danger par exemple (traverser un carrefour virtuel reste moins dangereux que traverser un carrefour réel). Il convient donc de prêter attention aux conséquences de la réussite en virtuel dans des situations dangereuses ; réussite qui pourrait donner un excès de confiance au sujet, susceptible de mettre à mal sa sécurité dans le monde réel. La réalité augmentée, qui est une technologie permettant d'intégrer des éléments virtuels en 3D (en temps réel) au sein d'un environnement réel pourrait, de ce point de vue, s'avérer plus écologique que la RV. Son principe est en effet de combiner le virtuel et le réel, donnant l'illusion d'une intégration parfaite à l'utilisateur.

La RV présente aussi un certain nombre de freins pour son intégration en pratique clinique. D'une part, sur le plan économique, même si les coûts d'équipement sont en baisse, ils restent encore importants. Il faut compter 3 500 à 8 000 euros pour un équipement informatique basique (un PC/Portable avec interfaces sensorielle et motrice), somme à laquelle il faut ajouter le logiciel, dont le coût du développement peut être de plusieurs dizaines/centaines de milliers d'euros. L'utilisation de la plateforme *open source*

NeuroVR [48], seule plateforme de RV gratuite, peut permettre de contourner le problème du coût logiciel. Elle propose des environnements préfigurés (supermarché, restaurant, etc.) auquel est jointe une bibliothèque d'objets 2D et 3D à placer librement pour créer des environnements d'évaluation/revalidation (un exemple : le VMET de Raspelli *et al.*) [49]. Un autre frein est le peu de collaboration entre les concepteurs de matériels et de logiciels. Ils se livrent plutôt à une concurrence rude avec une multiplication rapide des solutions proposées, celles-ci devenant très rapidement obsolètes. Sur le plan technique, les professionnels du champ de la neuropsychologie sont souvent peu compétents en développement informatique, tant pour générer et adapter des EV que pour développer des modules d'extraction et de compilation de données. Il faut enfin rappeler que la sollicitation simultanée de plusieurs modalités sensorielles pour favoriser l'immersion peut générer un conflit sensoriel occasionnant un inconfort/mal des simulateurs (*cybersickness* : mal de tête, vertiges voire nausées). Il est peu fréquent (5-10 % des gens), mais augmente avec le niveau d'immersion (plus fort sous un casque) et l'âge.

■ Télé-neuropsychologie

L'évolution constante des TIC et des équipements des familles ouvre la voie à une nouvelle forme de pratique de la neuropsychologie : la télé-neuropsychologie. Elle peut se définir comme l'évaluation et/ou la revalidation des patients à distance/domicile, sans présence physique du clinicien. L'intérêt souvent mis en avant pour son utilisation est de permettre de développer l'accès aux soins neuropsychologiques aux populations éloignées des centres de soins ou en difficulté de déplacement (comme en télé-médecine, la télé-psychiatrie ou télé-psychologie).

Cette approche a déjà fait l'objet de quelques travaux en visioconférence, montrant un potentiel intéressant. Par exemple, les études de Cullum et ses collaborateurs [50], chez des séries de sujets âgés (sains et avec troubles cognitifs), avec un nombre de participants parfois importants ($n = 200$), ont montré que la pratique était fiable (en comparant évaluation en présentiel et à distance) pour toute une série de tests : MMSE, *Hopkins Verbal Learning Test*, *Boston Naming*, fluences, empans de chiffres, dessin de l'horloge.

Aussi intéressante qu'elle puisse paraître, cette approche présente un certain nombre de limites, dont le niveau et le coût d'équipement des particuliers, la fiabilité du transfert de données, l'impossibilité de faire passer tous les types de tests à distance et la perte d'informations comportementales. Elle présente également des risques de différentes natures (éthique, etc.) ayant amené l'*American Psychology Association* (APA) à éditer, en 2013, un guide des bonnes pratiques tout à fait pertinent et intéressant (voir encadré 1).

Guide APA (2013) pour l'encadrement de la pratique de la télé-psychologie

1. Compétences du psychologue

Les psychologues doivent s'assurer de leurs compétences en regard de la technologie utilisée et de son impact sur leurs patients.

2. Standards de prise en charge dans les services de télé-psychologie

Les psychologues doivent s'assurer que les standards éthiques et professionnels de soin et de prise en charge soient respectés pendant toute la durée de la télé-psychologie.

3. Consentement

Les psychologues doivent obtenir un consentement spécifique pour la télé-psychologie. Ce faisant, les psychologues sont conscients des lois et règles applicables.

4. Confidentialité des données et information

Les psychologues doivent, dans la mesure du possible, protéger et maintenir la confidentialité des données relatives aux patients.

5. Sécurité et transmission des données

Les psychologues devront prendre des précautions pour la sécurisation des mesures et notamment contre la fuite ou le vol.

6. Disposition des données

Les psychologues devront faciliter l'accès aux données aux personnes autorisées.

7. Évaluation

Les psychologues doivent considérer les problèmes que peut poser l'utilisation de tests destinés à une passation en face à face lors d'une évaluation à distance.

8. Pratiques inter-juridictionnelles

Les psychologues doivent connaître et respecter les lois et règles de régulation engagées dans la pratique de la télé-psychologie notamment dans des juridictions ou des pays différents.

travail important reste à faire pour asseoir l'intérêt de la plupart des outils évoqués dans cet article.

Ainsi, pour ne prendre que l'exemple de la RV, l'essentiel des environnements actuellement utilisés en évaluation/revalidation neuropsychologiques ne sont, à de rares exceptions près, que des prototypes qui restent à développer pour une utilisation clinique.

De ce point de vue, on ne peut que saluer l'initiative du GRECO d'avoir mis en place des commissions travaillant sur l'utilisation et la normalisation d'outils numériques en neuropsychologie. Nous pensons à la commission Grépisode dont l'un des objectifs est la création d'une épreuve de RV évaluant la mémoire autobiographique épisodique à très long terme (Epirêve). Nous pensons également à la commission Grepad, dont l'objectif est de valider des épreuves neuropsychologiques de première ligne sur tablette numérique, dans le but d'être utilisées au lit du patient. L'effort est sûrement à intensifier, tout en gardant en perspective le risque qu'il y aurait à déshumaniser nos pratiques, à trop vouloir utiliser les nouvelles technologies (évaluation et revalidation à distance en particulier) en clinique quotidienne. Il faudra aussi réfléchir aux questions scientifiques, techniques, pratiques et éthiques que soulèveront ces nouvelles approches des troubles cognitifs et leur prise en charge. Ainsi, au plan éthique, il n'est pas justifié d'utiliser les nouvelles technologies uniquement parce que l'on sait faire. Qu'est-ce que l'utilisation des technologies numériques apporte vraiment au patient ? Est-ce que cela correspond à un besoin ? Est-ce que cela fait courir des risques physiologiques, psychologiques, numériques (captation de données par exemple), etc. Si oui lesquels ? Que fait-on pour y répondre efficacement ? Y a-t-il de vraies nécessités pour le clinicien ? Si oui, lesquelles et pourquoi ? Nous sommes, de ce point de vue, tout à fait en accord avec l'idée selon laquelle, dans un proche avenir, la SNLF devrait se saisir de ces questions pour débattre plus longuement et essayer de dégager des positions communes [3] à l'image, peut-être, de la démarche de l'APA.

Les questions à traiter nous paraissent nombreuses et nous en terminerons avec quelques-unes : Quelles sont les demandes/besoins des populations et correspondent-ils à ce que nous imaginons en neuropsychologie ? Comment faire progresser l'utilisation et la diffusion des outils numériques ? Faut-il envisager un accompagnement par des médiateurs et/ou des rééducateurs numériques formés spécifiquement dans cette perspective et/ou organisés en réseau d'assistance ? Sur un autre plan, peut-on utiliser les moyens numériques pour faire avancer la recherche avec le grand public, avec les malades (*open labs* dédiés à la construction et la validation d'outils et/ou de réseaux mobilisant des données de rééducation numérique) ? ■

Conclusion

Si la neuropsychologie semble aujourd'hui accuser un retard important dans l'utilisation du numérique et des nouvelles technologies dans ses pratiques cliniques, tant en évaluation qu'en revalidation, il n'en reste pas moins qu'un

Liens d'intérêts

les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt en rapport avec cet article.

Références

1. Parsons TD. *Clinical neuropsychology and technology*. New York, NY: Springer Press, 2016.
2. Kane RL, Parsons TD. *The role of technology in clinical neuropsychology*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2017.
3. Collette F, Amieva H, Eustache F. La neuropsychologie, une discipline d'avenir aux objectifs réaffirmés. The future and new missions of neuropsychology. *Rev Neuropsychol* 2017;9:145-53. doi:10.1684/nrp.2017.0424.
4. Bilder RM. Neuropsychology 3.0: evidence-based science and practice. *J Int Neuropsychol Soc* 2011;17:7-13. doi:10.1017/S1355617710001396.
5. Luria AR. *Higher cortical functions in man*. New York: Basic Book, 1966.
6. Broca P. Sur le siège de la faculté du langage articulé. *Bull Soc Anthr* 1865;6:377-93.
7. Diller L. A model for cognitive retraining in rehabilitation. *Clin Psychol* 1976;29:13-5.
8. Derouesné J, Seron X, Lhermitte F. Re-education of patients with frontal lesions. *Rev Neurol (Paris)* 1975;131:677-89.
9. Sohlberg MM, Mateer CA. *Introduction to cognitive rehabilitation: theory and practice*. New York: Guilford Press, 1989.
10. Franzen MD, Wilhelm KL. Conceptual foundations of ecological validity in neuropsychological assessment. In: Sbordone RJ, Long CJ, eds. *Ecological validity neuropsychol test*. Delray Beach, FL, England: Gr Press/St Lucie Press, 1996, p. 91-112.
11. Sternberg RJ. Intelligence and lifelong learning. What's new and how can we use it? *Am Psychol* 1997;52:1134-9.
12. Azouvi P, Didic-Hamel CM, Fluchaire I, et al. L'évaluation des fonctions exécutives en pratique clinique. *Rev Neuropsychol* 2001;11:383-433.
13. Eslinger PJ, Damasio AR. Severe disturbance of higher cognition after bilateral frontal lobe ablation Patient EVR. *Neurology* 1985;35:1731-1731. doi:10.1212/WNL.35.12.1731.
14. Rizzo A, Kim GJ. A SWOT analysis of the field of virtual reality rehabilitation and therapy. *Presence Teleop Virtual Environ* 2005;14:119-46. doi:10.1162/1054746053967094.
15. Seron X. La revalidation neuropsychologique : réflexions sur les tendances actuelles. In: Adam S, Allain P, Aubin G, Coyette F, eds. *Actualités en rééducation neuropsychologique : études de cas*. Marseille: Solal, 2009:9-28.
16. Bartram D, Bayliss R. Automated testing: past, present and future. *J Occup Psychol* 1984;57:221-37. doi:10.1111/j.2044-8325.1984.tb00164.x.
17. Reeves DL, Winter KP, Bleiberg J, et al. ANAM genogram: historical perspectives, description, and current endeavors. *Arch Clin Neuropsychol* 2007;22:S15-37. doi:10.1016/j.acn.2006.10.013.
18. Covassin T, Elbin RJ, Stiller-Ostrowski JL, et al. Immediate post-concussion assessment and cognitive testing (ImPACT) practices of sports medicine professionals. *J Athl Train* 2009;44:639-44. doi:10.4085/1062-6050-44.6.639.
19. Prouteau A, Verdoux H, Briand C, et al. Self-assessed cognitive dysfunction and objective performance in outpatients with schizophrenia participating in a rehabilitation program. *Schizophr Res* 2004;69:85-91. doi:10.1016/j.schres.2003.08.011.
20. Barkley RA, Murphy KR. The nature of executive function (EF) deficits in daily life activities in adults with ADHD and their relationship to performance on EF tests. *J Psychopathol Behav Assess* 2011;33:137-58. doi:10.1007/s10862-011-9217-x.
21. Melby-Lervåg M, Redick TS, Hulme C. Working memory training does not improve performance on measures of intelligence or other measures of "far transfer": evidence from a meta-analytic review. *Perspect Psychol Sci* 2016;11:512-34. doi:10.1177/1745691616635612.
22. Jamieson M, Cullen B, McGee-Lennon M, et al. The efficacy of cognitive prosthetic technology for people with memory impairments: a systematic review and meta-analysis. *Neuropsychol Rehabil* 2014;24:419-44. doi:10.1080/09602011.2013.825632.
23. Edwards J, Parsons TD. Virtual reality applications for neuropsychological assessment in the military. In: Kane RL, Parsons TD, eds. *Role technol clin neuropsychol*. Delray Beach, FL, England: Oxford University Press, 2017, p. 175-236.
24. You SH, Jang SH, Kim Y-H, et al. Virtual reality-induced cortical reorganization and associated locomotor recovery in chronic stroke: an experimenter-blind randomized study. *Stroke* 2005;36:1166-71. doi:10.1161/01.STR.0000162715.43417.91.
25. Bohil CJ, Alicea B, Biocca FA. Virtual reality in neuroscience research and therapy. *Nat Rev Neurosci* 2011;12:752-62.
26. Standen PJ, Brown DJ. Virtual reality in the rehabilitation of people with intellectual disabilities: review. *Cyberpsychol Behav* 2005;8:272-82. doi:10.1089/cpb.2005.8.272.
27. Harris K, Reid D. The influence of virtual reality play on children's motivation. *Can J Occup Ther Rev Can Ergother* 2005;72:21-9. doi:10.1177/000841740507200107.
28. Nolin P, Stipanovic A, Henry M, et al. ClinicaVR: classroom-CPT: a virtual reality tool for assessing attention and inhibition in children and adolescents. *Comput Hum Behav* 2016;59:327-33. doi:10.1016/j.chb.2016.02.023.
29. Canty AL, Neumann DL, Fleming J, et al. Evaluation of a newly developed measure of theory of mind: the virtual assessment of mentalising ability. *Neuropsychol Rehabil* 2015;0:1-37. doi:10.1080/09602011.2015.1052820.
30. Cipresso P, Paglia FL, Cascia CL, et al. Break in volition: a virtual reality study in patients with obsessive-compulsive disorder. *Exp Brain Res* 2013;229:443-9. doi:10.1007/s00221-013-3471-y.
31. Klinger E, Marié R-M, Josman N. Évaluation des fonctions exécutives par la réalité virtuelle : le VAP-S. *Kinesitherap Rev* 2009;9:32-4. doi:10.1016/S1779-0123(09)70709-0.
32. Henry M, Joyal CC, Nolin P. Development and initial assessment of a new paradigm for assessing cognitive and motor inhibition: the bimodal virtual-reality Stroop. *J Neurosci Methods* 2012;210:125-31. doi:10.1016/j.jneumeth.2012.07.025.
33. Sauzéon H, N'Kaoua B, Arvind Pala P, et al. Age and active navigation effects on episodic memory: a virtual reality study. *Br J Psychol* 2016;107:72-94. doi:10.1111/bjop.12123.
34. Lecouvey G, Gonneaud J, Piolino P, et al. Is binding decline the main source of the ageing effect on prospective memory? A ride in a virtual town. *Socioaffective Neurosci Psychol* 2017;7:1-16. doi:10.1080/20009011.2017.1304610.
35. Plancher G, Tirard A, Gyselinck V, et al. Using virtual reality to characterize episodic memory profiles in amnesic mild cognitive impairment and Alzheimer's disease: influence of active and passive encoding. *Neuropsychologia* 2012;50:592-602. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2011.12.013.
36. Jansari AS, Devlin A, Agnew R, et al. Ecological assessment of executive functions: a new virtual reality paradigm. *Brain Impair* 2014;15:71-87. doi:10.1017/Brlmp.2014.14.
37. Renison B, Ponsford J, Testa R, et al. The ecological and construct validity of a newly developed measure of executive function: the virtual library task. *J Int Neuropsychol Soc* 2012;18:440-50. doi:10.1017/S1355617711001883.
38. Neğüt A, Matu S-A, Sava FA, et al. Virtual reality measures in neuropsychological assessment: a meta-analytic review. *Clin Neuropsychol* 2016;30:165-84. doi:10.1080/13854046.2016.1144793.
39. Allain P, Foloppe DA, Besnard J, et al. Detecting everyday action deficits in Alzheimer's disease using a nonimmersive virtual reality kitchen. *J Int Neuropsychol Soc JINS* 2014;20:468-77. doi:10.1017/S1355617714000344.
40. Besnard J, Richard P, Banville F, et al. Virtual reality and neuropsychological assessment: the reliability of a virtual kitchen to assess daily-life activities in victims of traumatic brain injury. *Appl Neuropsychol Adult* 2016;23:223-35. doi:10.1080/23279095.2015.1048514.
41. Brooks BM. Route learning in a case of amnesia: a preliminary investigation into the efficacy of training in a virtual environment. *Neuropsychol Rehabil* 1999;9:63-76. doi:10.1080/713755589.

42. Foloppe DA, Richard P, Yamaguchi T, et al. The potential of virtual reality-based training to enhance the functional autonomy of Alzheimer's disease patients in cooking activities: a single case study. *Neuropsychol Rehabil* 2015 ; 20 : 1-25. doi:10.1080/09602011.2015.1094394.
43. Camara Lopez M, Cleeremans A. Intérêts et limites de la réalité virtuelle en revalidation neuropsychologique. In : Seron X, Van der Linden M, éd. *Traité Neuropsychol Clin Adulte, Tome 2 – Revalidation*. Louvain-La-Neuve :De Boeck Supérieur,2016.
44. Claessen MHG, Ham IJM, van der Jagersma E, et al. Navigation strategy training using virtual reality in six chronic stroke patients: a novel and explorative approach to the rehabilitation of navigation impairment. *Neuropsychol Rehabil* 2016 ;26 : 822-46. doi:10.1080/09602011.2015.1045910.
45. Jacoby M, Averbuch S, Sachar Y, et al. Effectiveness of executive functions training within a virtual supermarket for adults with traumatic brain injury. *2011 Int Conf Virtual Rehabil* 2011 : 1-7. doi:10.1109/ICVR.2011.5971834.
46. Katz N, Ring H, Naveh Y, et al. Interactive virtual environment training for safe street crossing of right hemisphere stroke patients with unilateral spatial neglect. *Disabil Rehabil* 2005 ;27 : 1235-44. doi:10.1080/09638280500076079.
47. Yip BCB, Man DWK. Virtual reality-based prospective memory training program for people with acquired brain injury. *Neuro Rehabil* 2013 ; 32 : 103-15. doi:10.3233/NRE-130827.
48. Riva G, Gaggioli A, Grassi A, et al. NeuroVR 2-a free virtual reality platform for the assessment and treatment in behavioral health care. *Stud Health Technol Inform* 2011 ; 163 : 493-5.
49. Raspelli S, Pallavicini F, Carelli L, et al. Validating the neuro VR-based virtual version of the multiple errands test: preliminary results. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 2012 ;21 : 31-42. doi:10.1162/PRES_a_00077.
50. Cullum CM, Hynan LS, Grosch M, et al. Teleneuropsychology: evidence for video teleconference-based neuropsychological assessment. *J Int Neuropsychol Soc* 2014 ;20 : 1028-33. doi:10.1017/S1355617714000873.