

L'Apport de la Réalité Virtuelle pour les Recherches sur la Lecture

Jonathan Mirault

Pôle pilote Ampiric, Institut National Supérieur du Professorat et de l'Éducation, Aix-

Marseille Université, Marseille, France

Laboratoire de Psychologie Cognitive, UMR 7290

Aix-Marseille Université & Centre National de la Recherche Scientifique,

Marseille, France

Titre courant : Réalité Virtuelle et Lecture

Correspondance

Jonathan Mirault (jonathan.mirault@univ-amu.fr)

Laboratoire de Psychologie Cognitive, UMR 7290

Aix-Marseille Université & Centre National de la Recherche,

3, place Victor Hugo, 13331 Marseille, France

Résumé (L'Apport de la Réalité Virtuelle pour les Recherches sur la Lecture)

L'impressionnant développement de la réalité virtuelle ces dernières années nous promet une implémentation dans de nombreux domaines dont celui de la recherche scientifique. Dans le cadre de la psychologie cognitive, le recours à cette nouvelle méthodologie permet d'augmenter grandement l'implication attentionnelle des participants lors des expériences. Un surprenant domaine concerné par la réalité virtuelle demeure celui des sciences du Langage. En effet, la présentation de texte dans des environnements virtuels calqués sur le monde réel permet de mieux comprendre les processus cognitifs qui sous-tendent la Lecture dans des milieux écologiquement valides tout en contrôlant de nombreuses variables. Cette nouvelle méthodologie d'investigation a récemment été utilisée dans des travaux chez les enfants (décision lexicale) ainsi que pour l'enregistrement des mouvements oculaires lors de tâches de lecture.

Abstract (The Contribution of Virtual Reality to Reading Research)

The great development of the virtual reality these last years gives us hope of an integration in numerous domains like scientific research. In the field of cognitive psychology, the use of this new methodology allows to greatly increase the attention of the participants during experiments. A surprising concerned domain by virtual reality remains Language's sciences. Indeed, text presentation in virtual environments pasted on the real world allows to better understand cognitive processes that subtend Reading in ecologically valid places while controlling various variables. This new technology of investigation has been recently used in studies with children (lexical decision) and in order to record eye movements during reading tasks.

Qu'est-ce que la Réalité Virtuelle (RV) ?

Proposé aux États-Unis dans les années 1980 par Jaron Lanier (fondateur de *VPL Research*), ce n'est qu'à partir de 1989 que le terme de « réalité virtuelle » commence à se démocratiser et à apparaître dans les journaux (Biocca et al., 1995). Cette « ultime forme d'interaction entre humains et machines » comme le définit Krueger en 1991 représenterait « un moyen pour les humains de visualiser, de manipuler et d'interagir avec des ordinateurs et des données extrêmement complexes » (Aukstakalnis & Blatner, 1992). Cette définition a été reprise en 2009 par Riva pour la caractériser par « l'emploi de simulations interactives créées par ordinateur pour donner aux utilisateurs la possibilité d'interagir, dans des environnements virtuels, avec des objets et des événements apparaissant similaires à ceux du monde réel ». On note cependant que le nombre de définitions subjectives continue de croître et de se diversifier (Cant et al., 2019 ; Steuer, 1992) bien que désormais les tendances actuelles se dirigent vers une standardisation des termes (voir Kardong-Edgren et al., 2019, pour revue) et des objets utilisés (Peeters, 2018) dans le monde de la RV. En effet, au vu du nombre croissant d'utilisateurs de cette nouvelle technologie dans de nombreux champs d'études, il est important de définir des termes communs afin que les communautés scientifiques puissent utiliser le même vocabulaire. Tiffany & Forneris (2018) estiment l'essor de l'utilisation de la RV de 10 % à 45 % dans les 5 prochaines années.

Il est également intéressant de se pencher sur l'association des mots du concept de « réalité virtuelle » car ces deux termes peuvent sembler contraires au premier abord. En effet, il est commun de mettre en opposition les notions de « réel » et de « virtuel » mais il est important ici de comprendre l'aspect de virtualité non pas comme quelque chose d'uniquement immatériel mais comme quelque chose qui pourrait exister (i.e., un état du réel). L'ensemble des informations perçues dans le monde virtuel sont bien réelles -dans le sens où elles sont

affichées sur un écran et non pas simplement imaginées- mais cet environnement, si imprégnant, se substitue au monde physique pour l'utilisateur.

Évoluer dans un Environnement Virtuel (EV)

De par la conception même des casques de RV : fixés sur la tête et centrés sur le mouvement des yeux dans l'espace (*Head-Up Displays* en Anglais), on comprend aisément que le but premier est d'évoluer en temps réel dans un environnement virtuel. Que l'on soit dans un EV qui imite le plus possible un milieu écologique (par exemple, simuler des conditions de conduite ou de pilotage pour s'exercer ou bien représenter un environnement familier comme l'intérieur d'une maison afin d'étudier les mouvements et le comportement de personnes atteintes de certains troubles cognitifs) ou dans des réalisations utopiques (étudier le comportement et les réactions physiologiques des utilisateurs dans des environnements ne suivant pas les lois de la Physique), nous avons affaire à un environnement où l'utilisateur est totalement impliqué car avec cette technologie il n'y a plus de distinction physique perceptible entre le cerveau (via l'œil) et le dispositif de présentation : on évolue désormais *dans* le stimulus lui-même !

Cette insertion dans le monde virtuel implique des aspects personnels relatifs aux utilisateurs que certains ont nommé *téléprésence* (Steuer, 1976 ; Slater, 2009), bien que le terme de *présence* soit préféré en RV. Ce concept se définit par la présence moyenne induite obtenue grâce à *l'immersion* et à *l'interactivité* en temps réel dans l'environnement. La notion d'immersion (ou richesse sensorielle) englobe les contingences sensori-motrices disponibles dans un EV. De hauts niveaux d'immersion mènent donc à de hauts niveaux de présence (Witmer & Singer, 1998). Cette notion est principalement obtenue en supprimant autant de sensations du monde réel que possible afin de les substituer avec des sensations équivalentes

dans l'environnement virtuel. L'immersion est intrinsèquement reliée à la nature multimodale de la perception et aux interactions possibles (Mestre et al., 2006).

Cette autre notion, celle de l'interactivité (capacité d'influence), n'est pas uniquement la possibilité de naviguer dans un EV, mais aussi et surtout la capacité de l'utilisateur à pouvoir utiliser des outils et à modifier son environnement par extension (Ryan, 1999 ; Auvray & Fuchs, 2007).

La présence est directement dépendante des capacités de l'utilisateur à déplacer son attention depuis un environnement physique vers un EV, tout en prenant également compte de la capacité à exclure les stimuli externes superflus de leur environnement physique (Witmer & Singer, 1998). En 1992, Sheridan proposait de répartir cette présence virtuelle sur un continuum composé de trois axes : 1) l'étendue des informations sensorielles, 2) le contrôle des capteurs sensoriels et 3) la capacité à modifier l'environnement. Cette décomposition ternaire (sensori-motrice, cognitive et fonctionnelle) se retrouve très bien illustrée dans le schéma technocentrique de référence de la réalité virtuelle (Fuchs et al., 2006, volume 2, page 13).

Il est aussi intéressant de noter que ces différents niveaux d'immersion et d'interaction dépendent aussi du matériel utilisé pour impliquer l'utilisateur dans un environnement virtuel. En 2015, Muhanna propose un classement « taxonomique » qui répartit l'ensemble des techniques actuelles de réalité virtuelle selon 2 principaux facteurs. Le premier facteur est celui du type de technologie utilisée : il peut être de base (diffusion de l'EV via un écran) ou amélioré (projection de l'EV sur les murs d'une salle ou dans un visuo-casque). Le second facteur, quant à lui, correspond aux différents niveaux d'immersion que la technologie concernée propose (pour une représentation détaillée, voir la Figure 2 de ses travaux « *Virtual reality and the CAVE : Taxonomy, interaction challenges and research directions* »).

L'utilisation de la réalité virtuelle dans le cadre de la Recherche

L'accès croissant à cette technologie a permis à de nombreux champs d'étude de bénéficier des apports de la réalité virtuelle. Elle devient un moyen novateur de pouvoir visualiser les données dans des domaines comme l'ingénierie (Wolfartsber, 2019), la robotique (Pérez et al., 2019), la biologie moléculaire (e.g., pour voir et manipuler des molécules en 3D, voir El Beheiry et al., 2019) et aussi dans le domaine médical pour l'observation et la détection de pathologies à partir de radiographies par exemple (Sousa et al., 2017). On insistera sur le grand intérêt de la Médecine qui y voit des moyens d'entraînements et de simulations inouïs pour les professionnels de la santé (McCarthy & Upport, 2019), de la médecine dentaire (Huang et al., 2018), de la chirurgie maxillo-faciale (voir Joda et al., 2019, pour une revue), de la neurochirurgie (Choque-Velasquez, 2018 et voir Lee & Wong, 2019, pour une revue) ou encore de la médecine légale (Koller et al., 2019). Des enregistrements physiologiques de l'activité cérébrale lors de l'évolution de patients dans des EV avec des techniques d'EEG (Tromp et al., 2018) et de MEG (Roberts et al., 2019) ont même déjà vu le jour.

C'est au début des années 90 que les prémices de l'utilisation de la RV comme moyen de soulager/guérir font leurs apparitions (Pugnetti et al., 1995 ; Rizzo, 1994 ; Rose, 1996). L'implication émotionnelle que provoque l'évolution dans les environnements virtuels influe largement sur des aspects psychosomatiques, ce qui a aussi permis de mettre au point des thérapies visant à diminuer la douleur (Chan et al., 2019) ou le stress (e.g., dans le cas de syndromes post-traumatiques, voir Reger et al., 2019) et a même été utilisé récemment à des fins anesthésiantes lors d'une opération d'orthopédie au centre médical d'Harboview de Seattle (Bhattacharjee, 2020).

Les aspects de neuro-réhabilitation et de recouvrement moteur montrent des résultats si encourageants (Schultheis & Rizzo, 2001 ; Rizzo et al., 2004 ; Parsons et al., 2011 ; Weiss et Katz, 2004 ; Arnoni et al., 2019. Voir Rose et al., 2018 et Weiss et al., 2006 pour des revues) que de nombreux cliniciens ont produit des outils de simulation et d'analyse de pathologies

comme la maladie de Parkinson (Mirelman et al., 2011 ; voir Dockx et al., 2016 et Bluett et al., 2019, pour des revues) ou d'Alzheimer (Cushman et al., 2008 ; Allain et al., 2014 ; voir Garcia-Betances et al., 2015 pour une revue).

Au niveau des études en sociologie, l'utilisation de la RV trouve aussi un grand intérêt. En effet, avoir l'opportunité de présenter à des personnes des environnements totalement créés de toutes pièces et de pouvoir « connecter » les gens entre eux a permis de mieux étudier les interactions sociales entre les utilisateurs. Hudson et al. (2019) ont étudié différents niveaux d'étude comme l'immersion, les interactions avec l'EV ou la satisfaction. Les interactions sociales, quant à elles, furent étudiées sur l'évaluation de quatre items « J'étais conscient des autres participants », « J'ai communiqué avec les autres participants », « J'étais complice avec les autres participants » et « J'ai interagi avec les autres participants » où chaque item était noté de 1 (pas du tout) à 7 (beaucoup). Les principaux résultats concernant les interactions sociales semblent assez contre-intuitifs : plus l'interaction sociale était forte, plus le phénomène d'immersion était faible. Pour essayer d'expliquer ce résultat, les auteurs ont mis en avant une interruption du continuum global de l'expérience virtuelle où les aspects relationnels avec les autres utilisateurs primeraient sur l'attention portée et ressentie sur l'EV.

Kim & Ko (2019) ont utilisé la réalité augmentée pour développer des expériences sociales améliorées comme par exemple lors d'évènements sportifs. La réalité augmentée (RA) se caractérise par la superposition en temps réel d'informations virtuelles (principalement visuelles de nos jours) sur les informations du monde réel (e.g., l'affichage du prénom de la personne à laquelle on parlerait, grâce à la reconnaissance faciale).

Le domaine du marketing et l'étude du comportement des consommateurs sont eux aussi grandement concernés par cette technologie afin de mieux cibler les attentes des clients en ayant la possibilité de créer des EV spécifiques (Pizzi et al., 2019 ; Loureiro et al., 2019 ;

Martínez-Navarro et al., 2019 ; Meißner et al., 2019 ; Flavián et al., 2019). En effet, en faisant évoluer des participants dans des environnements spécifiques, il devient beaucoup plus aisé de percevoir le type de comportement / stratégie adopté par ceux-ci lors de la prise de décision pour des éventuels achats.

Comprendre le comportement et les réactions de l'Homme dans diverses situations devient donc possible dans des EV de plus en plus réalistes. Les comportements en conduite automobile (Blissing et al., 2019), les prises de décisions en situations d'urgence en lien avec la détection des blocs autonomes d'éclairage de sécurité (BAES) ou le balisage des chemins d'évacuation (Tsang et al., 2009) et même la manipulation d'extincteurs et de systèmes anti-feu (Çakiroğlu & Gökoğlu, 2019) sont des exemples parmi tant d'autres qui montrent le grand intérêt de la simulation comportementale.

De manière générale, les différents aspects des EV ainsi que la capacité de créer des retours sensoriels divers (audition, odorat, toucher) engendreront une ouverture d'autant plus large dans de nouveaux domaines de la Recherche.

Le cas de la Recherche en Psychologie Cognitive de la Lecture.

Pionnier dans le domaine, Peeters met en avant en 2019 la réalité virtuelle comme une nouvelle méthodologie expérimentale pour étudier les sciences du langage. Il insiste principalement sur la consistance des effets de lecture et de langage dans des environnements naturels (Eichert et al., 2018 ; Peeters & Dijkstra, 2018). En effet, la validation écologique est un concept clé au cœur des débats scientifiques car les mises en situation en laboratoire peuvent, dans certains cas, être perçues comme éloignées de la réalité (certains utilisent même le terme de *Real Reality* pour parler de notre environnement en opposition au concept de *Virtual Reality*). Heyselaar et collaborateurs ont montré en 2017 que les utilisateurs employaient le même type de langage dans les conditions où ils parlaient à un agent virtuel et dans celles où

ils parlaient à un agent humain. Il a aussi été montré (Gijssels et al., 2016 ; Staum Casasanto & Casasanto, 2010) que les utilisateurs adaptaient leur discours en fonctions du débit et de la hauteur des paroles de l'interlocuteur virtuel auxquels ils parlaient (paramètres qu'il ne serait pas possible de contrôler strictement avec un interlocuteur humain). La RV se placerait donc aisément parmi les techniques de recherches dans le domaine de la lecture pouvant mettre en avant de nouvelles réponses à des questions fondamentales et appliquées.

Un des points importants à mentionner ici est le fait que l'utilisation de cette technologie permet un contrôle total des stimuli sensoriels et principalement visuels avec une mainmise absolue sur des phénomènes tels que la saillance visuelle par exemple. Partant de là, il a été logique de voir apparaître des technologies de suivi du regard (oculométrie ou *eye-tracking* en Anglais). En effet, de nos jours plusieurs casques de RV incorporent des systèmes d'oculométrie (basés sur la détection de la pupille à l'aide d'un rayonnement infra-rouge à l'intérieur du casque) qui permettent une nouvelle forme d'étude et d'interaction visuelle dans les EV (Fove0 ou HTC Vive Pro Eye pour ne citer que les plus connus). Il est important de noter également le grand intérêt des casques de RV dans les études oculométriques : en effet, avec un tel système, la calibration, une fois faite, ne peut plus être perdue au cours de l'expérience car le dispositif est attaché à la tête du participant. Dans les expériences d'oculomotricité « classiques » (*Desktop Mounted* en Anglais), on a recours à des mentonnières pour maintenir la position de la tête du participant en place et même parfois à des supports que les participants doivent mordre afin que la tête soit vraiment immobile. Il existe bien des systèmes « tête-libre » (*Head Free-to-Move*) qui permettent un suivi du regard sans contraintes physiques pour le participant mais les précisions spatiales et temporelles s'en voient diminuées. La RV apporte donc une solution semblable à celle proposée par les systèmes

d'oculométrie attachés à la tête des participants (*Head-Mounted* en Anglais) mais avec l'avantage de ne pas présenter les caméras dans le champ visuel de l'utilisateur.

En plus de cette fonction d'*eye-tracking* on notera aussi la présence de systèmes *head-contingent* (i.e., alloués à la position de la tête) qui se basent sur des capteurs de position externes (i.e., dans la pièce dans laquelle l'utilisateur évolue) ou de capteurs liés à l'inertie du casque dans l'espace. Ces nouveaux systèmes ont pour première vocation d'offrir une meilleure expérience virtuelle aux utilisateurs et ainsi de diminuer les effets néfastes (e.g., nausée, migraine) que peuvent ressentir rarement certaines personnes.

Nous avons donc un ensemble d'outils qui va permettre d'élargir le champ des recherches sur la lecture en étudiant les aspects comportementaux et physiologiques des participants de manière innovante et avec un maintien accru de l'attention. Ce fut le cas de deux études que nous avons mené récemment : la première (Mirault et al., 2020; publiée dans *Methods in Psychology*), répliquait les effets de transposition des mots dans la phrase (voir Mirault et al., 2018) à la différence que nous avons utilisé pour la première fois un casque de réalité virtuelle (le système Fove0) pour mesurer les réponses comportementales (i.e., taux d'erreur et temps de réponse) et oculomotrices (i.e., temps des premières fixations, temps du regard, taux de refixation et de saut de mots). La tâche était identique à l'expérience originale : les participants devaient décider le plus rapidement et le plus correctement si une suite de mots constituait une séquence agrammaticale ou une phrase grammaticalement correcte. Nous avons recruté 40 étudiants normo-lecteurs de l'Université d'Aix-Marseille entre 18 et 29 ans, tous naïfs par rapport aux objectifs de l'étude. Au niveau des mesures comportementales, nous avons défini le temps de réponse comme la différence de temps entre la présentation des stimuli et la réponse du participant (via une manette). Les réponses étaient codées de manière binaires (1 si la réponse était correcte et 0 si elle était fausse). En ce qui concerne les mesures

oculomotrices, nous avons mesuré les durées de fixations sur les mots cibles (les 2 mots transposés dans chacune des séquences de mots ; e.g., *le petit **regarde garçon** un avion*), les probabilités de fixation, de refixation et de régressions sur ces zones ainsi que le temps total de lecture de l'ensemble des mots constituant la séquence expérimentale.

Similairement à l'étude initiale, nous avons pu mettre en avant un taux d'erreur et un temps de réaction significativement supérieurs dans les conditions où des mots étaient transposés (TW pour *Transposed-Word*) à partir d'une phrase grammaticalement correcte (e.g., « ton petit avait chat faim ») par rapport à la condition contrôle (CTRL) où des mots étaient transposés à partir d'une séquence agrammaticale (e.g., « cette grande est tasse faim »). L'étude en oculomotricité nous a permis de mettre en avant que les temps de lecture des phrases étaient eux aussi plus élevés de manière significative dans la condition TW par rapport à la condition CTRL. Au niveau local (sur les mots transposés), nous n'avons pas relevé de différences significatives que ce soit au niveau de la durée des premières fixations ou au niveau des taux de refixation et d'omission. Pour finir, le point le plus important de cette étude reste le fait que nous avons pu montrer que les taux d'erreur étaient identiques -et significatifs- quand les participants regardaient les mots dans l'ordre de présentation (i.e., les mots sont lus en respectant l'ordre de gauche à droite) par rapport au cas où les participants lisaient les mots dans l'ordre grammatical (i.e., dans la phrase « ton petit avait chat faim », le participant lirait « ton » puis « petit » puis « chat » puis « avait » et « faim » pour finir ; dans ce cas l'ordre grammatical ne correspond pas avec l'ordre de présentation des mots de gauche à droite) ce qui tend à prouver que les effets globaux comportementaux précédemment décrits ne sont pas dus uniquement aux situations où les participants suivaient l'ordre grammatical de la séquence de mots.

La seconde étude (Mirault et al., 2021) s'est déroulée sur une population de 100 enfants de CE2 où les auteurs ont proposé aux élèves de lire des mots et des non-mots de manière

classique (i.e., sur des feuilles de papier) et d'autre part à travers un casque de réalité virtuelle. En plus du fait que nous avons pu montrer que la présentation des stimuli dans l'environnement virtuel répliquait exactement le pattern décrit par les méthodes standards (aux alentours des 45 non-mots et 75 mots par minute), les données comportementales montraient des taux d'erreur et des temps de réponse significativement plus élevés dans la condition *non-mot* par rapport à la condition *mot*. Les données oculomotrices, quant à elles, nous ont permis de mettre en avant des taux de refixation et des durées de fixation significativement plus importantes lors de la présentation des non-mots et plus important, la mise en évidence de fortes corrélations entre les données comportementales et les données oculomotrices (vitesse de lecture).

Enfin, dans une troisième étude en cours de création¹, nous prévoyons d'utiliser la réalité virtuelle afin de présenter un environnement semblable à ce que peut rencontrer un automobiliste lors d'une phrase de conduite sur l'autoroute et devant extraire des informations orthographiques provenant de panneaux informatifs. Une première partie « exploratoire » (Mirault & Grainger, 2021) a été réalisée en ligne en présentant uniquement l'environnement virtuel via un écran standard afin d'étudier les prémices des réponses comportementales dans ce type de simulation. A terme, nous utiliserons un co-enregistrement de données avec d'un côté un suivi oculomoteur (à l'intérieur du casque de réalité virtuelle) et de l'autre côté un suivi de l'activité électroencéphalographique. L'immersion sera grandement accrue grâce à l'utilisation d'un système de volant et de pédales numériques. La tâche expérimentale de cette étude consistera en une tâche de décision lexicale (TDL) où des mots fréquemment présents (ou non) sur des panneaux d'autoroute (e.g., « sortie », « route », « vitesse ») seront présentés en version normale ou en version transposée (i.e., « sortie » devient « sotrie », « route » devient « ruote » et « vitesse » devient « vitsese »).

¹ Les conditions sanitaires actuelles (CoVid-19) ne nous permettent pas de continuer ces travaux ni de passer à la phase de recrutement et de passation de participants.

Comme expliqué dans les sections précédentes, les avantages certains de ce système seront de pouvoir contrôler l'environnement affiché aux participants sans les mettre en danger en les plaçant en situation réelle de conduite sur autoroute.

Les limites de l'utilisation de la réalité virtuelle

D'un point de vue purement technologique, les limites inhérentes à la réalité virtuelle résident dans la perturbation de la boucle « perception, cognition, action » causée par des latences (immersion et interaction ne se réalisent plus en temps réel) et des incohérences sensori-motrices (Fuchs et al., 2006).

Cependant, bien que représentant un idéal technologique pour beaucoup, certains se posent la question -à juste titre- de la dangerosité de l'utilisation de tels systèmes. Mon-Williams & Wann ont montré en 1998 que l'utilisation prolongée d'un système qui demande un focus constant peut engendrer des déficits de la vision binoculaire sur le long terme. D'autres ont également remarqué des cas de « maladie virtuelle » (*cybersickness* en Anglais) qui serait associés à des épisodes nauséux (cinétose) liés à des attitudes posturales (Arcioni et al., 2019) et dépendante du genre (i.e., les femmes y seraient plus sujettes, voir Mufano et al., 2017). La création d'un questionnaire pour évaluer le malaise ressenti en RV (Kim et al., 2018) et des méthodes pour récupérer après des séances de RV (Tanaka et Takagi, 2004) permettent de mieux appréhender et soulager les personnes atteintes de ces maux.

Il est donc important de prendre en compte ce paramètre de temps d'utilisation lors de la création d'un design expérimental impliquant un système de réalité virtuelle – comme ce fut le cas dans les 2 études de l'auteur et collaborateurs (Mirault et al., 2020 ; Mirault et al., 2021) présentées dans la section précédente.

Perspectives

La réalité virtuelle offre des perspectives exceptionnelles pour l'étude des sciences du comportement humain. Cette technologie propose un environnement très stable et contrôlé sur l'ensemble des principaux paramètres qui la composent ainsi que des moyens modernes pour mieux approfondir la recherche dans les sciences cognitives.

Les prochains paliers technologiques permettront aux casques de RV d'avoir de meilleures performances techniques (e.g., fréquence d'échantillonnage des écrans, diminution des risques de fatigue oculaire, fréquence d'enregistrement des mouvements oculaires augmentée, etc..) dans des systèmes réduits et allégés. La Recherche en sera grandement impactée avec la création et l'amélioration de nouveaux outils de mesures et d'analyses des systèmes d'intégration d'oculométrie et d'électroencéphalographie à l'aide de visuo-casque (voir le casque déjà existant de LooxidVR) ou sans (voir Tromp et al., 2018).

On notera aussi l'important développement actuel de l'implémentation multi-sensorielle dans les environnements virtuels comme la présence de sons stéréophoniques (pour renforcer l'aspect tridimensionnel) mais aussi de dispositifs haptiques (sous forme de gants) pour simuler les afférences tactiles liées à la préhension et à la manipulation d'objets ainsi que des combinaisons incorporant des électrodes pour reproduire des stimuli physiques. Des plateformes de marche ont également vu le jour et permettent d'ajouter des aspects kinesthésiques et proprioceptifs afin de parfaire l'expérience vécue en réalité virtuelle.

Conclusion

Bien que la technologie limite souvent la réalisation des idées nouvelles, la réalité virtuelle permet désormais de franchir un cap considérable en termes de présentation, d'immersion et d'interaction entre l'utilisateur et le monde expérimental. En matière d'investigations dans le domaine des sciences du Langage et notamment de la psycholinguistique, l'utilisation combinée d'environnements virtuels complexes et réalistes avec un affichage fluide en temps réel via un visuo-casque performant nous permet de mieux appréhender certaines questions et d'y apporter des réponses innovantes. A l'avenir, les enregistrements multimodaux (oculométrie, EEG, comportementaux ; voir les travaux de Tromp et collaborateurs en 2018) permettront à la Recherche de s'immiscer à de hauts rangs de technologies et d'expertises de pointe.

Conflit d'intérêt

Aucun

Remerciement

L'auteur souhaite remercier Agnès Guerre-Genton pour la qualité des échanges sur le sujet ainsi que Jonathan Grainger pour ses conseils avisés et ses relectures éclairées.

Références bibliographiques

Allain, P., Foloppe, D. A., Besnard, J., Yamaguchi, T., Etcharry-Bouyx, F., Le Gall, D., ... & Richard, P. (2014). Detecting everyday action deficits in Alzheimer's disease using a nonimmersive virtual reality kitchen. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 20(5), 468-477.

Arcioni, B., Palmisano, S., Apthorp, D., & Kim, J. (2019). Postural stability predicts the likelihood of cybersickness in active HMD-based virtual reality. *Displays*, 58, 3-11.

Arnoni, J. L. B., Pavão, S. L., dos Santos Silva, F. P., & Rocha, N. A. C. F. (2019). Effects of virtual reality in body oscillation and motor performance of children with cerebral palsy: A preliminary randomized controlled clinical trial. *Complementary therapies in clinical practice*, 35, 189-194.

Aukstakalnis, S., & Blatner, D. (1992). *Silicon mirage; the art and science of virtual reality*. Peachpit Press.

Auvray, M., & Fuchs, P. (2007). Perception, immersion et interactions sensorimotrice en environnement virtuel. *Intellectica*, 45(1), 23-35.

Bhattacharjee, Y. (2020). Ils luttent contre le mal. *National Geographic*, Janvier 2020, 44-70.

Biocca, F., & Delaney, B. (1995). Immersive virtual reality technology. *Communication in the age of virtual reality*, 15, 32.

Blissing, B., Bruzelius, F., & Eriksson, O. (2019). Driver behavior in mixed and virtual reality—a comparative study. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 61, 229-237.

Bluett, B., Bayram, E., & Litvan, I. (2019). The virtual reality of Parkinson's disease freezing of gait: A systematic review. *Parkinsonism & related disorders*, 61, 26-33.

Çakiroğlu, Ü., & Gökoğlu, S. (2019). Development of fire safety behavioral skills via virtual reality. *Computers & Education*, 133, 56-68.

Chan, E., Hovenden, M., Ramage, E., Ling, N., Pham, J. H., Rahim, A., ... & Jeyachanthiran, K. (2019). Virtual reality for pediatric needle procedural pain: two randomized clinical trials. *The Journal of pediatrics*, 209, 160-167.

Choque-Velasquez, J., Colasanti, R., Collan, J., Kinnunen, R., Jahromi, B. R., & Hernesniemi, J. (2018). Virtual reality glasses and “eye-hands blind technique” for microsurgical training in neurosurgery. *World neurosurgery*, 112, 126-130.

Cant, R., Cooper, S., Sussex, R., & Bogossian, F. (2019). What's in a name? Clarifying the nomenclature of virtual simulation. *Clinical Simulation in Nursing*, 27, 26-30.

Cushman, L. A., Stein, K., & Duffy, C. J. (2008). Detecting navigational deficits in cognitive aging and Alzheimer disease using virtual reality. *Neurology*, 71(12), 888-895.

Dockx, K., Bekkers, E. M., Van den Bergh, V., Ginis, P., Rochester, L., Hausdorff, J. M., ... & Nieuwboer, A. (2016). Virtual reality for rehabilitation in Parkinson's disease. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (12).

Eichert, N., Peeters, D., & Hagoort, P. (2018). Language-driven anticipatory eye movements in virtual reality. *Behavior research methods*, 50(3), 1102-1115.

El Beheiry, M., Doutreligne, S., Caporal, C., Ostertag, C., Dahan, M., & Masson, J. B. (2019). Virtual reality: beyond visualization. *Journal of molecular biology*.

- Flavián, C., Ibáñez-Sánchez, S., & Orús, C. (2019). The impact of virtual, augmented and mixed reality technologies on the customer experience. *Journal of Business Research*, *100*, 547-560.
- Fuchs, P. et al. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle* (Vol. 2). Presses des MINES.
- García-Betances, R. I., Arredondo Waldmeyer, M. T., Fico, G., & Cabrera-Umpiérrez, M. F. (2015). A succinct overview of virtual reality technology use in Alzheimer's disease. *Frontiers in aging neuroscience*, *7*, 80.
- Gijssels, T., Casasanto, L. S., Jasmin, K., Hagoort, P., & Casasanto, D. (2016). Speech accommodation without priming: The case of pitch. *Discourse Processes*, *53*(4), 233-251.
- Heyselaar, E., Hagoort, P., & Segaert, K. (2017). In dialogue with an avatar, language behavior is identical to dialogue with a human partner. *Behavior research methods*, *49*(1), 46-60.
- Huang, T. K., Yang, C. H., Hsieh, Y. H., Wang, J. C., & Hung, C. C. (2018). Augmented reality (AR) and virtual reality (VR) applied in dentistry. *The Kaohsiung journal of medical sciences*, *34*(4), 243-248.
- Hudson, S., Matson-Barkat, S., Pallamin, N., & Jegou, G. (2019). With or without you? Interaction and immersion in a virtual reality experience. *Journal of Business Research*, *100*, 459-468.
- Joda, T., Gallucci, G. O., Wismeijer, D., & Zitzmann, N. U. (2019). Augmented and virtual reality in dental medicine: A systematic review. *Computers in biology and medicine*.
- Kardong-Edgren, S. S., Farra, S. L., Alinier, G., & Young, H. M. (2019). A Call to Unify Definitions of Virtual Reality. *Clinical Simulation in Nursing*, *31*, 28-34.
- Kim, H. K., Park, J., Choi, Y., & Choe, M. (2018). Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment. *Applied ergonomics*, *69*, 66-73.
- Kim, D., & Ko, Y. J. (2019). The impact of virtual reality (VR) technology on sport spectators' flow experience and satisfaction. *Computers in Human Behavior*, *93*, 346-356.
- Koller, S., Ebert, L. C., Martinez, R. M., & Sieberth, T. (2019). Using virtual reality for forensic examinations of injuries. *Forensic science international*, *295*, 30-35.
- Krueger, M. W. (1991). Artificial reality: Past and future. *Virtual Reality: Theory, Practice and Promise/Ed. SK Helsel, JP Roth.—Westport, London: Meckler*, 19-26.
- Lee, C., & Wong, G. K. C. (2019). Virtual reality and augmented reality in the management of intracranial tumors: a review. *Journal of Clinical Neuroscience*, *62*, 14-20.
- Loureiro, S. M. C., Guerreiro, J., Eloy, S., Langaro, D., & Panchapakesan, P. (2019). Understanding the use of Virtual Reality in Marketing: A text mining-based review. *Journal of Business Research*, *100*, 514-530.
- Martínez-Navarro, J., Bigné, E., Guixeres, J., Alcañiz, M., & Torrecilla, C. (2019). The influence of virtual reality in e-commerce. *Journal of Business Research*, *100*, 475-482.
- McCarthy, C. J., & Uppot, R. N. (2019). Advances in Virtual and Augmented Reality—Exploring the Role in Health-care Education. *Journal of Radiology Nursing*, *38*(2), 104-105.
- Meißner, M., Pfeiffer, J., Pfeiffer, T., & Oppewal, H. (2019). Combining virtual reality and mobile eye tracking to provide a naturalistic experimental environment for shopper research. *Journal of Business Research*, *100*, 445-458.
- Mestre, D., Fuchs, P., Berthoz, A., & Vercher, J. L. (2006). Immersion et présence. *Le traité de la réalité virtuelle. Ecole des Mines de Paris*, 309-38.
- Mirault, J., Albrand, J-P., Lassault, J., Ziegler, J., & Grainger, J. (2021). Using Virtual Reality to Study Words Reading in Children. *Frontiers in Education: Assessment, Testing and Applied Measurement*.

- Mirault, J., & Grainger, J. (2021). Single Word Reading in the “Real” World: Effects of Transposed-Letters. *Journal of Cognition*, 4(1).
- Mirault, J., Guerre-Genton, A., Dufau, S., & Grainger, J. (2020). Using Virtual Reality to Study Reading: An Eye-Tracking investigation of Transposed-Word effects. *Methods in Psychology*, 3, 100029.
- Mirault, J., Snell, J., & Grainger, J. (2018). You that read wrong again! A transposed-word effect in grammaticality judgments. *Psychological Science*, 29(12), 1922-1929.
- Mirelman, A., Maidan, I., Herman, T., Deutsch, J. E., Giladi, N., & Hausdorff, J. M. (2011). Virtual reality for gait training: can it induce motor learning to enhance complex walking and reduce fall risk in patients with Parkinson's disease? *The Journals of Gerontology: Series A*, 66(2), 234-240.
- Mon-Williams, M., & Wann, J. P. (1998). Binocular virtual reality displays: When problems do and don't occur. *Human Factors*, 40(1), 42-49.
- Muhanna, M. A. (2015). Virtual reality and the CAVE: Taxonomy, interaction challenges and research directions. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 27(3), 344-361.
- Munafo, J., Diedrick, M., & Stoffregen, T. A. (2017). The virtual reality head-mounted display Oculus Rift induces motion sickness and is sexist in its effects. *Experimental brain research*, 235(3), 889-901.
- Parsons, T. D., Courtney, C. G., Arizmendi, B. J., & Dawson, M. E. (2011). Virtual reality stroop task for neurocognitive assessment. In *MMVR* (pp. 433-439).
- Peeters, D., & Dijkstra, T. (2018). Sustained inhibition of the native language in bilingual language production: A virtual reality approach. *Bilingualism: Language and Cognition*, 21(5), 1035-1061.
- Peeters, D. (2018). A standardized set of 3-D objects for virtual reality research and applications. *Behavior research methods*, 50(3), 1047-1054.
- Peeters, D. (2019). Virtual reality: A game-changing method for the language sciences. *Psychonomic bulletin & review*, 26(3), 894-900.
- Pérez, L., Diez, E., Usamentiaga, R., & García, D. F. (2019). Industrial robot control and operator training using virtual reality interfaces. *Computers in Industry*, 109, 114-120.
- Pizzi, G., Scarpi, D., Pichierri, M., & Vannucci, V. (2019). Virtual reality, real reactions?: Comparing consumers' perceptions and shopping orientation across physical and virtual-reality retail stores. *Computers in Human Behavior*, 96, 1-12.
- Pugnetti, L., Mendozzi, L., Motta, A., Cattaneo, A., Barbieri, E., & Brancotti, A. (1995). Evaluation and retraining of adults' cognitive impairments: Which role for virtual reality technology? *Computers in Biology and Medicine*, 25(2), 213-227.
- Reger, G. M., Smolenski, D., Norr, A., Katz, A., Buck, B., & Rothbaum, B. O. (2019). Does virtual reality increase emotional engagement during exposure for PTSD? Subjective distress during prolonged and virtual reality exposure therapy. *Journal of anxiety disorders*, 61, 75-81.
- Riva, G. (2009). Virtual reality: an experiential tool for clinical psychology. *British Journal of Guidance & Counselling*, 37(3), 337-345.
- Rizzo, A. A., Schultheis, M., Kerns, K. A., & Mateer, C. (2004). Analysis of assets for virtual reality applications in neuropsychology. *Neuropsychological rehabilitation*, 14(1-2), 207-239.
- Rizzo, A. A. (1994). Virtual Reality applications for the cognitive rehabilitation of persons with traumatic head injuries. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Virtual Reality And Persons With Disabilities*. CSUN: Northridge.

- Roberts, G., Holmes, N., Alexander, N., Boto, E., Leggett, J., Hill, R. M., ... & Kessler, K. (2019). Towards OPM-MEG in a virtual reality environment. *NeuroImage*, *199*, 408-417.
- Rose, F. D. (1996). Virtual reality in rehabilitation following traumatic brain injury. In *Proceedings of the European Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technology* (pp. 5-12).
- Rose, T., Nam, C. S., & Chen, K. B. (2018). Immersion of virtual reality for rehabilitation-Review. *Applied ergonomics*, *69*, 153-161.
- Ryan, M. L. (1999). Immersion vs. interactivity: Virtual reality and literary theory. *SubStance*, *28*(2), 110-137.
- Schultheis, M. T., & Rizzo, A. A. (2001). The application of virtual reality technology in rehabilitation. *Rehabilitation psychology*, *46*(3), 296.
- Sheridan, T. B. (1992). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, *1*(1), 120-126.
- Sousa, M., Mendes, D., Paulo, S., Matela, N., Jorge, J., & Lopes, D. S. (2017). Vrrrroom: Virtual reality for radiologists in the reading room. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 4057-4062).
- Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behavior in immersive environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, *364*, 3549-3557.
- Staum Casasanto, L., Jasmin, K., & Casasanto, D. (2010). Virtually accommodating: Speech rate accommodation to a virtual interlocutor. In *32nd Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci 2010)* (pp. 127-132). Cognitive Science Society.
- Steuer, R. E. (1976). Multiple objective linear programming with interval criterion weights. *Management Science*, *23*(3), 305-316.
- Steuer, J. (1992). Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. *Journal of communication*, *42*(4), 73-93.
- Tanaka, N., & Takagi, H. (2004). Virtual reality environment design of managing both presence and virtual reality sickness. *Journal of physiological anthropology and applied human science*, *23*(6), 313-317.
- Tiffany, J., & Forneris, S. (2018). The forecast for tech usage and growth in nursing education [blog post]. Retrieved from <https://nlnteq.org/2018/02/07/the-forecast-for-tech-usage-and-growth-in-nursing-education-part-4-of-the-series-the-future-of-technology-in-nursing-education>
- Tromp, J., Peeters, D., Meyer, A. S., & Hagoort, P. (2018). The combined use of virtual reality and EEG to study language processing in naturalistic environments. *Behavior Research Methods*, *50*(2), 862-869.
- Tang, C. H., Wu, W. T., & Lin, C. Y. (2009). Using virtual reality to determine how emergency signs facilitate way-finding. *Applied ergonomics*, *40*(4), 722-730.
- Weiss, P. L., & Katz, N. (2004). The potential of virtual reality for rehabilitation. *J Rehabil Res Dev*, *41*(5), 7-10.
- Weiss, P. L., Kizony, R., Feintuch, U., & Katz, N. (2006). Virtual reality in neurorehabilitation. *Textbook of neural repair and rehabilitation*, *51*(8), 182-97.
- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence*, *7*(3), 225-240.
- Wolfartsberger, J. (2019). Analyzing the potential of Virtual Reality for engineering design review. *Automation in Construction*, *104*, 27-37.