

# Entraînement multisensoriel à la localisation sonore en réalité virtuelle : application au développement de jeux sérieux thérapeutiques

## Mots clés

Réalité Virtuelle (RV), Interaction Homme-Machine (IHM), Audio 3D, Apprentissage multisensoriel, Jeux sérieux, Thérapie, Négligence spatiale unilatérale

## Profil et compétences recherchées

Master 2 Recherche (ou ingénieur) en Informatique, Sciences Cognitives ou Psychologie Cognitive, spécialisé en IHM, Réalité Virtuelle ou en Audio 3D.

Nous recherchons des candidats motivés, ouverts aux approches pluridisciplinaires, si possible avec une expérience en RV/RA ou jeux vidéo 3D, des compétences en conception de scènes 3D interactives et d'environnements sonores spatialisés, de bonnes connaissances des méthodologies expérimentales, et de bonnes capacités d'écriture scientifique en anglais. De plus, afin de pouvoir communiquer aisément avec les praticiens et les utilisateurs visés, la pratique courante du français à l'oral est exigée.

## Résumé

L'objectif de cette thèse est d'optimiser les méthodes de restitution sonore spatialisée (audio 3D) en réalité virtuelle (RV) par la création de programmes multimodaux d'apprentissage de la localisation sonore, développés sous forme de jeux sérieux permettant aux utilisateurs d'améliorer leurs performances en termes de perception précise de l'espace sonore.

La conception de ces programmes reposera sur l'étude de deux aspects essentiels : d'une part le rôle de chaque modalité sensorielle dans cet apprentissage de la localisation sonore, et d'autre part le choix des mécaniques de jeux, tant pour renforcer les capacités visées d'audition spatiale, que pour favoriser l'expérience utilisateur (motivation et engagement de l'utilisateur).

En outre, cette thèse abordera une application possible des rendus audio 3D en RV : la réhabilitation de troubles de cognition spatiale suite à un AVC (syndrome de Négligence Spatiale Unilatérale). Une partie de la thèse sera donc consacrée à l'adaptation des interactions dans les programmes multimodaux développés, pour prendre en compte les différents handicaps moteurs, perceptifs et cognitifs pouvant impacter les utilisateurs finaux.

## 1. Cadre général

Le projet doctoral présenté ici s'inscrit dans un objectif à plus long terme de concevoir un programme de réhabilitation en RV, fondé sur la réappropriation de l'espace sonore, pour les patients ayant développé un syndrome de Négligence Spatiale Unilatérale (NSU) suite à un accident vasculaire cérébral (AVC).

Ce syndrome, qui apparaît chez 30% des patients atteints d'un AVC (120 000 personnes par an en France), est caractérisé par des difficultés de prise en compte d'une partie de l'espace, impactant très fortement la vie quotidienne des patients atteints de NSU. Or, sa prise en charge se heurte actuellement à de nombreuses limites notamment en termes d'efficacité pour lesquelles la RV et la modalité auditive pourraient apporter des solutions. En effet, alors que les patients atteints de NSU détectent mal les stimuli visuels, ils détectent assez bien les sons qui restent cependant très difficiles à localiser [Guilbert 2016]. Nous nous proposons de détourner ici les programmes d'entraînement à la localisation sonore utilisés en réalité virtuelle pour les intégrer dans un programme de réhabilitation qui permettrait aux patients négligents de se réappropriier l'espace.

Des travaux sur ce projet ont été initiés lors du projet régional RFSI AudioRV-NSU, financé pour l'année universitaire 2019-2020 et coordonné par la co-encadrante, Tifanie Bouchara. Cette année de financement s'était concentrée, d'une part, sur l'étude du suivi oculaire comme outil de pointage, et d'autre part, sur le développement en RV d'outils et scénarios 3D d'évaluation du niveau d'atteinte du syndrome. Le projet doctoral présenté ci-après concerne plus particulièrement l'optimisation de la

méthode de réhabilitation en elle-même, c'est-à-dire l'entraînement à la localisation sonore, et s'adresse donc à tout type d'utilisateurs de réalité virtuelle souhaitant bénéficier au mieux de l'expérience d'immersion par une meilleure restitution sonore.

## 2. Contexte et objectifs

En réalité virtuelle, afin d'augmenter l'immersion des utilisateurs au sein des environnements virtuels simulés, il est nécessaire d'intégrer des sons localisés le plus précisément possible dans l'espace sonore (audio 3D) [Serafin2018].

La synthèse binaurale, principale méthode d'audio 3D utilisée avec les casques de RV, repose sur des filtres perceptifs individuels appelés HRTF (Head Related Transfer Functions), représentant pour chaque individu les effets induits par la forme de ses propres oreilles, tête et torse. Pour restituer parfaitement l'espace sonore, la synthèse binaurale devrait donc avoir accès aux HRTFs individuelles de chaque utilisateur [Wenzel1993]. Malheureusement la mesure de ces HRTFs est un processus complexe et coûteux en temps, ce qui limite l'accès à la synthèse binaurale et favorise l'usage d'HRTF génériques, dites non-individuelles, conduisant à des erreurs de localisation très fréquentes (confusion avant-arrière). Pour pallier ce problème, de nombreuses études ont proposé des protocoles d'entraînement, au travers desquels une partie des utilisateurs au moins pouvait s'adapter à d'autres HRTFs en quelques séances courtes [Honda2013, Carlile2014, Parseihian2012, Stitt2017, Steadman2019, Bouchara2019]. L'enjeu est bien évidemment de raccourcir cet entraînement tout en augmentant son effet (amélioration des performances de localisation sonore, prolongation de la durée de l'adaptation). Profitant des avantages d'un apprentissage multisensoriel [Kim2008], ces programmes se reposent sur le couplage de deux (audio-visuel, audio-prioprioception), voire trois [Bouchara2019], modalités sensorielles. Toutefois, aucune comparaison de ces différentes combinaisons n'a encore été réalisée. Un premier apport de cette thèse sera alors de déterminer puis d'optimiser la contribution de chaque modalité sensorielle.

Une seconde phase de la thèse sera d'optimiser la tâche d'apprentissage en elle-même. Il s'agira alors de déterminer, parmi les tâches proposées dans l'état de l'art et réalisables par les utilisateurs en guise d'entraînement à la localisation sonore, celles qui sont les plus efficaces. De plus, bien que des études aient tenté par le passé de rendre ces entraînements ludiques [Steadman2020], elles concluent sur des difficultés à engager pleinement les utilisateurs, à cause de mauvais choix de tâches et mécaniques de jeu (choix des récompenses et des challenges). Nous souhaitons nous attaquer à ce problème en appliquant des modèles éprouvés pour la conception de jeux sérieux thérapeutiques [MallaOsman2015, Mader2016] favorisant la motivation des joueurs. De plus, nous chercherons à déterminer, à partir d'une analyse des mécaniques de jeu traditionnelles, celles favorisant l'exploration spatiale autour de l'utilisateur (égocentrée) et donc susceptibles de favoriser l'apprentissage de la localisation sonore. Une réflexion sera portée sur la scénarisation de ces mécaniques de jeu permettant d'introduire du son spatialisé. Des expérimentations permettront de valider ou invalider une nouvelle hypothèse selon laquelle le niveau et la durée de l'exploration spatiale du programme d'apprentissage sont corrélés à l'amélioration des performances observables sur un participant et conditionne donc la possibilité d'adaptation d'un participant à des HRTF non-individuelles.

Enfin, un dernier objectif de ce projet est de rendre ces programmes d'entraînement sonore accessibles à des patients NSU souffrant d'autres handicaps, moteurs ou psycho-cognitifs, suite à leur AVC. Par une démarche de conception centrée-utilisateur, cette démarche passera d'abord par l'adaptation des contrôles et des retours sensoriels utilisés (modification des données d'entrée et de sortie en interaction homme-machine). Dans un premier temps, nous nous appuyerons sur les guides de conception de jeux accessibles pré-existants [Westin2018], que cette thèse nous permettra également d'enrichir par la prise en compte du NSU. Des expérimentations seront également mises en place pour vérifier que les programmes d'apprentissage de la localisation sonore sont effectifs aussi chez les patients et qu'ils leur permettent de se réapproprier l'espace.

### **3. Méthodologie / échéancier**

Les différentes phases de travail nécessaires à la réussite de ce projet doctoral sont :

1° Etat de l'art [3 mois] – Revue de littérature pluridisciplinaire sur les différentes thématiques liées au sujet (Audio 3D, perception multisensorielle, jeux sérieux VR...)

2° Optimisation par combinaison multisensorielle des programmes d'apprentissage de la localisation sonore [9 mois] – Comparaison de plusieurs combinaisons multimodales et différents types d'apprentissage (actif, passif, par feedback...) pour déterminer, d'une part, les méthodes les plus efficaces pour s'adapter à un retour sonore non-individualisé et, d'autre part, le rôle de chaque modalité dans l'apprentissage de la localisation sonore. Les expérimentations s'effectueront sur des participants sains.

3° Optimisation des tâches et mécaniques de jeux (ludification) [9 mois] – il s'agit de favoriser l'apprentissage sonore par exploration spatiale et augmenter l'engagement et la motivation des utilisateurs. Les évaluations s'effectueront sur des participants sains.

4° Adaptation des interactions pour rendre les programmes d'apprentissage de la localisation sonore accessibles à des patients NSU [9 mois]

5° Publications et rédaction du manuscrit [6 mois]

Il est à noter que les passations expérimentales nécessaires pour valider l'efficacité de notre programme d'entraînement sonore RV comme programme de réhabilitation auprès des patients (*évaluation permettant de mesurer les transferts vers la vie réelle des compétences apprises*) seront menés par les collaborateurs extérieurs cités ci-après. Ces passations s'appuieront sur les développements de jeux sérieux fournis par le doctorant lors des phases 2 et 3.

#### **Encadrement**

Directeur de thèse (15%) : Pierre-Henri Cubaud, PU équipe ILJ du CNAM-CEDRIC

Co-encadrante (55%) : Tifanie Bouchara, MCF équipe ILJ du CNAM-CEDRIC, spécialiste en Audio 3D et expérience utilisateur en VR.

Du fait du caractère pluridisciplinaire, Alma Guilbert, MCF en Psychologie Cognitive et Neuropsychologie au laboratoire VAC, U. de Paris participera également au co-encadrement de cette thèse (30%).

Le doctorant réalisera sa recherche et développements en RV et Audio 3D au CEDRIC sur les équipements acquis par le financement DIM-RFSI AudioRV-NSU (ordinateur VR + casque audio + casque VR). Il sera amené à se déplacer au VAC pour la mise en place de la validation expérimentale auprès de participants sains ainsi que dans les hôpitaux partenaires pour les pré-tests du programme auprès des patients cérébrolésés.

#### **Collaborations**

Des collaborations sont déjà en place avec les Hôpitaux de Paris Pitié Salpêtrière et Hôpital St-Maurice. Ainsi, les études menées en présence de patients NSU seront réalisées par les collaborateurs des services de médecine physique et de réadaptation de ces hôpitaux franciliens. De son côté, le doctorant devra fournir des solutions aux problèmes cognitifs et d'accessibilité motrice des patients, et des implémentations fonctionnelles pour les tester auprès de personnes saines et des patients.

#### **Ouverture Internationale**

Séjour doctoral possible dans des équipes étrangères (respectivement avec Catherine Guastavino, MIL, Canada, Lorenzo Picinali, Imp. College of London, Angleterre ou Ewen McDonald, DTU Health Tech, Danemark) travaillant en audio 3D et apprentissage de la localisation sonore.

## **Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant : diffusion, publication et confidentialité, droit à la propriété intellectuelle,...**

Rédaction d'articles scientifiques et participation aux conférences des domaines concernés en Audio3D (AES, ICAD,...), Réalité Virtuelle (revues VR-Springer, Presence, Frontiers in Virtual Realities, Frontiers in Human Media Interaction ; conférences IEEE VR, ACM VRST, EuroVR...), Psychologie cognitive appliquée (Human Factors, Journal of experimental psychology ... ) ou en e-santé (Frontiers in digital health).  
Présentation des dispositifs mis en place auprès des services de prise en charge de la négligence spatiale unilatérale.

## **Bibliographie**

- [Guilbert2016] **Guilbert, A.**, Clément, S., et al (2016). Auditory lateralisation deficits in neglect patients. *Neuropsychologia*, 85. 177-183.
- [Serafin2018] Serafin, S., Geronazzo, M., et al (2018). Sonic Interactions in Virtual Reality: State of the Art, Current Challenges, and Future Directions. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 38(2), 31–43.
- [Wenzel1993] Wenzel, E. M., Arruda, M., et al (1993). Localization using non-individualized head-related transfer functions. *Journal of the Acoustical Society of America*. 94, 111–123.
- [Honda2007] Honda, A., Shibata, H., et al (2007). Transfer effects on sound localization performances from playing a virtual three-dimensional auditory game. *Applied Acoustics*, 68(8), 885-896.
- [Parseihian2012] Parseihian, G., & Katz, B. F. G. (2012). Rapid head-related transfer function adaptation using a virtual auditory environment. *Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4), 2948-2957.
- [Stitt2019] Stitt, P., Picinali, L., & Katz, B. F. (2019). Auditory accommodation to poorly matched non-individual spectral localization cues through active learning. *Nature, Scientific Reports*, 9(1), 1-14.
- [Steadman2019] Steadman, M. A., Kim, C., et al (2019). Short-term effects of sound localization training in virtual reality. *Nature, Scientific Reports*, 9(1), 1-17.
- [Bouchara2019] **Bouchara, T.**, Bara, T-G., Weiss, P-L & **Guilbert, A.** Influence of vision on short-term sound localization training with non-individualized HRTF. *EAA Spatial Audio Signal Processing Symposium*, Sep 2019, Paris, France, 55-60.
- [Kim2008] Kim, R. S., Seitz, A. R., & Shams, L. (2008). Benefits of Stimulus Congruency for Multisensory Facilitation of Visual Learning. *PLOS ONE* 3(1): e1532.
- [MallaOsman2015] Malla Osman, Z., **Cubaud, P.**, et al (2015). Monitoring Player Attention: A Non-Invasive Measurement Method Applied to Serious Games. *Entertainment Computing*, vol. 14, 33-34.
- [Mader2016] Mader, S, Levieux G., & Natkin, S. "A Game Design Method for Therapeutic Games," *2016 8th International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications (VS-GAMES)*, Barcelona, 2016, 1-8.
- [Westin2018] Westin T., Ku J.J., et al (2018) Game Accessibility Guidelines and WCAG 2.0 – A Gap Analysis. In *Computers Helping People with Special Needs. ICCHP 2018. LNCS 10896*, Springer, 270-279.