

■ LES AUTEURS



Matthieu AUSSAL est ingénieur de recherche au Centre de mathématiques appliquées (CMAP) de l'École polytechnique, à Palaiseau.

François ALOUGES est professeur de mathématiques appliquées au CMAP.

Matthieu Aussal a reçu en 2015 le prix AMIES (Agence pour les mathématiques en interaction avec l'entreprise et la société) pour sa thèse de doctorat.

ces systèmes laisse peu de doutes quant à leur avenir.

Ces casques de visualisation immersive commencent à livrer des informations acceptables et persuasives pour notre système visuel. Mais il n'en est pas de même pour ce qui est des informations fournies à notre système auditif.

De quoi s'agit-il ? Au même titre que nos yeux nous permettent de voir en trois dimensions, nos oreilles nous fournissent, inconsciemment et en continu, des informations spatiales contenues dans le son, notamment sur la position et le mouvement des sources sonores. Lorsque ces informations auditives sont absentes, voire contradictoires avec les informations visuelles, notre système cognitif le supporte mal. Parfois, il supprime même l'illusion offerte par le dispositif de réalité virtuelle, ce qui rend désagréable l'expérience vécue par l'utilisateur et peut même provoquer des nausées.

La compréhension des mécanismes physiques et physiologiques de la spatialisation sonore est donc indispensable pour offrir une expérience immersive, complète et persuasive de réalité virtuelle : s'il est facile de comprendre que nos deux yeux voient la même scène d'un point de vue légèrement différent, il est beaucoup plus difficile de savoir ce qu'entend exactement chacune de nos oreilles lorsque nous sommes plongés dans une scène sonore.

Parmi les nombreuses recherches consacrées à ce sujet, l'une des démarches consiste à simuler par ordinateur, à l'aide de modèles mathématiques, la propagation des ondes sonores, de la source du son jusqu'au

conduit auditif de l'oreille. Ces simulations numériques, qui sont l'objet du présent article, peuvent en effet livrer des résultats comparables à ceux des mesures effectuées en laboratoire, mais avec davantage de souplesse et de répétabilité, pour un coût modique. Ces « expériences numériques » autorisent la confrontation d'hypothèses, la validation ou l'invalidation de modèles, et fournissent des données utiles pour les applications destinées au grand public.

Pour mieux comprendre l'intérêt des recherches sur le son 3D et l'approche par la simulation numérique, rappelons qu'il existe déjà sur le marché des dispositifs réalisant une spatialisation du son, au moyen d'un ensemble de haut-parleurs diffusant chacun un canal sonore approprié. Les chaînes *home cinema* 5.1 ou 7.1, voire les 64 canaux proposés par le système Atmos de Dolby, en sont des exemples. Ces dispositifs permettent de positionner virtuellement des objets sonores autour de l'auditeur, en jouant par exemple sur des différences d'intensité entre les haut-parleurs, des effets de retard ou de réverbération. C'est une sorte de généralisation du système de stéréophonie bien connu.

Un rendu spatial avec juste un casque

D'autres techniques plus récentes, telles que la HOA (*High Order Ambisonics*, « ambisonie d'ordre élevé ») ou la WFS (*Wave Field Synthesis*, ou « synthèse de front d'ondes »), fonctionnent sur des principes équivalents, quoique plus complexes dans leur formalisme mathématique.

Cependant, tous ces systèmes sont confrontés à la même limitation : la précision du rendu spatial est directement proportionnelle au nombre d'enceintes. Ils restent donc encombrants, malgré les efforts de miniaturisation. Aussi, bien que ces dispositifs soient tout indiqués pour équiper de grands volumes (salles de cinéma, auditoriums, salles de spectacle, etc.), ils sont incompatibles avec la portabilité et la mobilité des casques de réalité virtuelle. Il faut donc se tourner vers la technique de spatialisation sonore adaptée, à savoir la « synthèse binaurale » sur casque audio.

L'écoute binaurale désigne les perceptions auditives engendrées par une stimulation sonore des deux oreilles. L'idée de la synthèse binaurale est donc de synthétiser le son adéquat destiné à chaque oreille.

LE SYSTÈME WAVE FIELD SYNTHESIS (WFS), ou Synthèse de front d'ondes, ici celui de l'Ircam à Paris, utilise un grand nombre de haut-parleurs pour créer dans l'espace des « hologrammes sonores », c'est-à-dire des sources virtuelles donnant l'impression que c'est d'elles, et non des haut-parleurs, qu'émane le son.

