

> est décrit et reproduit quel que soit le placement des auditeurs. La technique est donc particulièrement adaptée aux situations où les auditeurs sont multiples et en mouvement, comme les concerts, les installations sonores, les expositions... Cette technique a d'ailleurs été utilisée pour les expositions Dada, en janvier 2006, et Beckett, en 2007, au Centre Pompidou, à Paris.

LA DÉCOMPOSITION DU SON

L'autre approche pour reconstruire le champ acoustique est la décomposition en harmoniques (la famille des formats Ambisonics). Introduite dans les années 1970 par Michael Gerzon, alors à l'université d'Oxford, elle fait depuis une vingtaine d'années l'objet de nombreuses recherches. Elle repose également sur un formalisme physique, mais adopte un point de vue centré sur l'auditeur.

Par analogie avec l'analyse de Fourier, qui consiste à représenter un signal sous la forme d'une superposition de fonctions sinusoïdales, le champ acoustique entourant l'auditeur est représenté par une superposition de fonctions périodiques de l'espace (des harmoniques sphériques ou cylindriques), chacune associée à un canal audio (voir l'encadré page 75). Pour représenter un signal ayant une forte variabilité temporelle, on utilise des composantes sinusoïdales de fréquences élevées; de même, plus on désire décrire de façon précise l'organisation spatiale d'une scène sonore, plus il faut tenir compte des harmoniques spatiales d'ordre élevé et donc utiliser un nombre important de canaux. Pour encoder l'intégralité de l'information spatiale, il faudrait en théorie une infinité de canaux.

Le principal intérêt du format Ambisonics est que l'encodage est indépendant du dispositif de restitution et hiérarchique. Le signal envoyé à chaque haut-parleur est une combinaison linéaire des canaux correspondant à chaque harmonique, dont les coefficients ne dépendent que du nombre et de la position des enceintes autour des auditeurs. Pour reproduire une scène sonore avec une précision spatiale – un ordre d'harmonique – donnée, il suffit de disposer d'un nombre de haut-parleurs supérieur ou égal aux nombres de canaux. Si l'on ne dispose pas d'assez de haut-parleurs, la scène peut être néanmoins décodée sans déformation, mais avec une précision spatiale inférieure.

Cette technique est bien adaptée aux applications de réalité virtuelle. On peut en effet enregistrer une scène sonore complexe comportant de nombreuses sources en encodant son organisation tridimensionnelle, puis l'importer dans un environnement virtuel. La facilité de manipulation permet de réorienter la scène en 3D pour compenser le mouvement de la tête de l'utilisateur.

Les systèmes de spatialisation ne peuvent se contenter de simuler la direction des sources

composant une scène virtuelle. Ils doivent aussi rendre compte de l'interaction des ondes avec l'environnement, dont la réflexion et la diffraction sur les obstacles et les parois. Reproduire ces effets est primordial pour que l'auditeur puisse estimer correctement la distance de la source et construire une représentation auditive cohérente du lieu virtuel où il évolue.

Parmi les différentes approches, on retrouve la distinction entre la synthèse par échantillonnage, par modèle physique ou par analyse et synthèse des propriétés acoustiques de la salle virtuelle. Toutes aboutissent cependant à un filtre, par lequel le son brut émis par la source doit être transformé pour reproduire les effets de l'environnement. Une première possibilité est d'acquérir des réponses acoustiques d'environnements réels. C'est l'extension de la technique binaurale, à ceci près que l'enregistrement est réalisé non plus dans une chambre anéchoïque, mais dans la salle que l'on veut simuler. Le filtre obtenu consigne l'ensemble

Grâce au théâtrophone, Marcel Proust écoutait en stéréo des pièces de théâtre sans sortir de chez lui.



des réflexions et absorptions subies par les ondes sonores. On constitue ainsi une bibliothèque de réponses de salles typiques. À l'instar de la technique binaurale, cette méthode garantit l'authenticité auditive de la simulation, mais elle souffre du caractère figé de la situation enregistrée. En particulier, elle interdit toute interactivité puisque la réponse est établie pour une position et une orientation données de la source et du récepteur, dans un lieu donné.

L'approche physique repose sur la simulation du comportement acoustique des parois du lieu virtuel. Les méthodes les plus courantes se fondent sur le modèle des « rayons sonores » qui se propagent en ligne droite dans l'espace. Les algorithmes construisent de façon itérative l'ensemble des chemins le long desquels le son se propage, en s'appuyant sur des modèles de diffusion atmosphérique, de réflectance des surfaces, de diffraction des arêtes... Les propriétés géométriques de l'ensemble des chemins permettent la construction d'un filtre encodant toutes les propriétés de la salle. Ces approches font l'objet de nombreuses recherches, notamment pour accélérer les calculs en vue d'une utilisation en temps réel.

LA RÉALITÉ SONORE AUGMENTÉE

Enfin, pour les situations de réalité virtuelle ne nécessitant pas un trop fort degré de cohérence entre le rendu sonore et visuel, on peut recourir à un modèle perceptif de l'effet de la salle, contrôlable par un ensemble de paramètres pertinents pour la perception, par exemple l'effet Doppler pour les sources en mouvement. Sans passer par une description exhaustive des propriétés du lieu, ce modèle permet notamment de déduire la durée de réverbération en fonction de données architecturales globales telles que le volume, et le rapport entre le niveau du son direct et le niveau de réverbération selon la distance entre la source et le récepteur.

La prise en compte de ces propriétés perceptives aide aussi à optimiser les algorithmes de simulation physique, ce qui est indispensable en cas de multiplicité des sources, faute de quoi les capacités de calcul des processeurs sont très vite dépassées. L'équipe de recherche REVES de l'Inria, par analogie avec des techniques de rendu graphique, exploite les propriétés de masquage auditif pour simplifier le traitement de la spatialisation sans dégradation du réalisme.

LA RÉALITÉ

VIRTUELLE

EST UN OUTIL

ESSENTIEL

À LA RECHERCHE

SUR LA PERCEPTION,

EN PARTICULIER

AUDITIVE

L'intérêt grandissant pour les environnements immersifs et interactifs, y compris dans le domaine artistique, incite à replacer les questions de spatialisation du son dans le cadre plus large de l'interaction entre les sens visuel, auditif et proprioceptif. À ce titre, la reproduction holo-phonique et la reproduction binaurale couplées à un dispositif de suivi du mouvement sont privilégiées, car elles assurent la correspondance en continu entre les indices auditifs spatiaux et les mouvements d'un utilisateur.

Par exemple, depuis 2013, en partenariat avec France Télévisions, Radio France, Orange..., nous développons le projet BiLi (*Binaural Listening*) qui consiste à déployer des solutions d'écoute binaurale individualisée pour le grand public. L'idée est d'améliorer l'expérience personnelle sur les appareils personnels (tablette, smartphones...) qui constituent aujourd'hui l'essentiel des moyens d'écoute. Quatre défis ont dû être relevés : définir une méthodologie pour évaluer la qualité d'expérience des auditeurs ; acquérir les filtres HRTF d'un individu ; concevoir un standard correspondant à ces données HRTF individuelles ; enfin, élaborer des processeurs d'écoute binaurale en temps réel et multiplateforme.

Les diverses technologies de spatialisation sonore que nous venons d'exposer témoignent de la vitalité des recherches dans ce domaine. Par ailleurs, il est intéressant de constater que les modèles ne précèdent pas toujours les technologies : si le formalisme décrivant la reproduction du champ acoustique précède de plus d'un siècle les premiers essais des systèmes WFS, *a contrario*, les premières réalisations de la stéréophonie précèdent les travaux qui en décrivent les fondements perceptifs. Le « théâtrophone » (voir la figure page ci-contre) de l'inventeur Clément Ader, qui permettait à Marcel Proust d'écouter par téléphone et en stéréo des retransmissions de théâtres parisiens, précède ainsi de vingt ans les travaux de Lord Rayleigh sur la localisation auditive !

De nos jours, la réalité virtuelle est à la fois un miroir de nos propres connaissances – on y expérimente le savoir qu'on y a injecté –, mais aussi un terrain d'approfondissement des connaissances, car elle permet de manipuler nos sens. Au-delà des applications artistiques, ludiques ou industrielles, la réalité virtuelle est un outil essentiel à la recherche sur la perception, en particulier auditive. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. HENDRICKX ET AL., Improvement of externalization by listener and source movement using a « binauralized » microphone array, *JAES*, vol. 65, pp. 589-599, 2017.

A. ANDREOPOULOU ET B. KATZ, Identification of perceptually relevant methods of inter-aural time difference estimation, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 141, 3635, 2017.

N. TSINGOS ET O. WARUSFEL, Modèles pour le rendu sonore. Dispositifs et interfaces de restitution sonore spatiale, in *Traité de la réalité virtuelle*, P. Fuchs et G. Moreau, Les presses de l'École des Mines de Paris, 2005.