

réel, la spatialisation peut tenir compte à la fois de la position de l'auditeur, de celle de la source sonore et de leur orientation relative. En cela, la synthèse binaurale est parfaitement adaptée aux systèmes de réalité virtuelle.

La synthèse binaurale semble attrayante, mais plusieurs difficultés expliquent qu'elle peine à se concrétiser en dehors des laboratoires de recherche.

Tout d'abord, les mesures des filtres HRTF sont par nature discrètes, ponctuelles : elles ne couvrent pas tout l'espace, car on n'a évidemment pas un haut-parleur pour chaque point de la sphère qui entoure l'auditeur. Il faut donc interpoler ou extrapoler les valeurs des filtres HRTF, ce qui peut nuire à la qualité du rendu sonore 3D. De plus, les mesures sont entachées d'erreurs, en raison de la complexité du dispositif mis en œuvre.

Par ailleurs, on effectue généralement les mesures dans des environnements dont l'acoustique est contrôlée, souvent en chambre sourde (c'est-à-dire avec des murs absorbants qui éliminent les réflexions). Seul le son direct émis par la source est alors mesuré : l'environnement ne joue pas de rôle. Or notre capacité à localiser les sons est bien plus efficace dans une pièce où les nombreuses réflexions, sur les murs et sur les objets qui s'y trouvent, sont autant d'indices qui permettent à notre cerveau de localiser rapidement et avec précision la source sonore. L'effet de l'environnement est donc à prendre en compte.

... remplacées par des simulations numériques

On peut contourner ces principaux facteurs limitants de la synthèse binaurale à l'aide de la simulation numérique de la propagation des sons. La physique de la propagation des ondes est modélisée par des équations dont les plus connues (et les plus simples) sont celles dites de d'Alembert et de Helmholtz (voir l'encadré ci-dessus).

Or on peut calculer les filtres HRTF en résolvant numériquement ces équations pour des ondes sonores qui se propagent vers une tête humaine, celle-ci étant aussi représentée par un modèle numérique. On utilise ensuite ces HRTF, déterminées par des « mesures numériques », en lieu et place des HRTF déterminées par des « mesures analogiques » de laboratoire. On lève ainsi deux des verrous précédemment

Équations de d'Alembert et de Helmholtz

L'équation qui régit l'évolution de la pression acoustique P (une fonction de la position (x, y, z) et du temps t) dans un milieu homogène (l'air ambiant) et se propageant à vitesse c s'écrit :

$$\partial^2 P / \partial t^2 - c^2 \Delta P = 0,$$

où $\partial^2 P / \partial t^2$ est la dérivée seconde de P par rapport au temps t , en supposant les autres variables (x, y, z) constantes (c'est une « dérivée partielle »), et ΔP désigne l'expression $\partial^2 P / \partial x^2 + \partial^2 P / \partial y^2 + \partial^2 P / \partial z^2$.

Cette équation des ondes, dite de d'Alembert, est linéaire, c'est-à-dire que la somme de deux solutions est encore une solution. En cherchant des solutions particulières de la forme :

$$P(x, y, z, t) = u(x, y, z) e^{i 2\pi f t},$$

expression qui correspond à une onde stationnaire oscillant à la fréquence f , on

trouve que la fonction u doit obéir à l'équation dite de Helmholtz :

$$\Delta u + k^2 u = 0,$$

où $k = 2\pi f / c$ est le « nombre d'onde ». Cette équation aux dérivées partielles est elle aussi linéaire. Cette propriété permet, en utilisant des techniques du calcul intégral datant de la fin du XIX^e siècle, de transformer l'équation de Helmholtz en une équation comportant des intégrales où n'interviennent que les valeurs prises par la fonction u sur la frontière du domaine, qui est une surface. Cette formulation sous la forme d'une équation intégrale présente plusieurs avantages pour la résolution numérique, notamment celui de réduire considérablement la partie de l'espace qu'il faut discrétiser.

POUR MESURER EXPÉRIMENTALEMENT les filtres HRTF qui caractérisent l'influence de la forme de la tête sur les sons perçus, on utilise une tête artificielle, où un petit microphone est inséré dans chaque oreille.



© Neumann

évoqués pour la synthèse binaurale, à savoir le caractère discret, non continu, des mesures de laboratoire et les erreurs qui les affectent.

Cette approche est très attrayante, car elle ne nécessite pas de matériel complexe de mesure ni d'ordinateur particulièrement puissant. De plus, on peut personnaliser le calcul en utilisant un modèle numérique de la tête d'un auditeur particulier, et obtenir des résultats suffisamment fins pour éviter d'avoir à interpoler les valeurs des HRTF.

Le troisième verrou, lié à la prise en compte de la réverbération (les réflexions des ondes sonores), peut aussi être levé en résolvant cette fois un modèle de propagation d'ondes dans une salle. En fonction du modèle choisi et des éventuelles simplifications appliquées à la physique du problème, on peut même envisager que ce calcul soit effectué en temps réel.

Résoudre l'équation des ondes

En pratique, la précision des HRTF nécessite une résolution précise des équations de propagation, tandis que le calcul de la réverbération peut être plus grossier. Cela s'explique notamment par la taille respective des détails géométriques à modéliser : la physique liée aux pavillons des oreilles est bien plus subtile que celle liée aux murs plans d'une pièce.