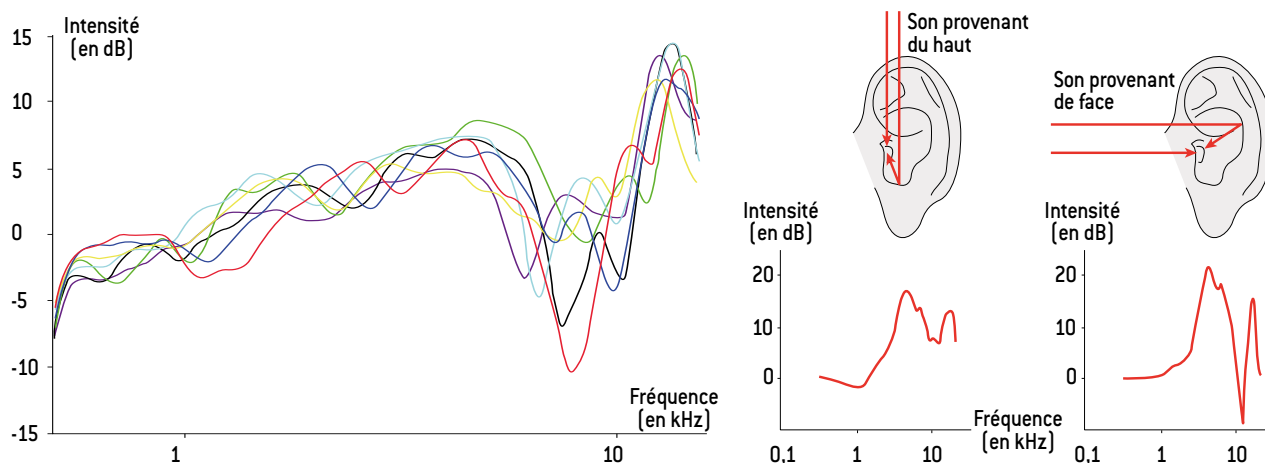




POUR UNE DIRECTION D'INCIDENCE donnée, le son qui parvient au pavillon de l'oreille dépend de la morphologie de la tête de l'auditeur et de son pavillon (à gauche, différentes courbes correspondant à différents

auditeurs). Les variations sont plus importantes pour les sons aigus (plus de 1 kHz). Pour un même individu, on a aussi des variations selon la direction d'incidence (graphiques de droite).

Avant d'expliquer plus précisément en quoi consiste la synthèse binaurale, on peut retracer brièvement sa préhistoire. La première expérience de spatialisation sonore remonte à la fin du XIX^e siècle, avec le théâtrophone (1881) de Clément Ader. Il s'agissait du premier service de retransmission en direct de spectacles, combinant à la fois téléphonie et stéréophonie (voir l'illustration ci-dessous).

Dans les années 1930, l'ingénieur britannique Alan Blumlein introduisit l'enregistrement stéréophonique, tandis que le physicien américain Harvey Fletcher déposa un brevet décrivant un système de téléphone binaural.

L'idée du système de Fletcher était d'utiliser une tête artificielle pour effectuer une prise de son binaurale, à l'aide d'un microphone placé au creux du pavillon de chaque oreille du mannequin, ce dernier devant imiter au mieux la morphologie humaine. Les ondes sonores sont alors diffractées par les détails morphologiques du mannequin, et le son ainsi transformé est enregistré par les microphones. Cet enregistrement stéréophonique particulier peut ensuite être écouté sur n'importe quel casque audio, ce qui donne un résultat souvent spectaculaire (écouter par exemple *Virtual Barber Shop*, sur www.youtube.com/watch?v=IUDTlvagjJA).

LE THÉÂTROPHONE conçu par Clément Ader retransmettait le son capté par deux microphones placés sur la scène de l'opéra ou du théâtre : une sorte de stéréophonie en direct, par téléphone.

Il faut souligner que la sensation d'espace procurée par le dispositif de Fletcher est uniquement perceptive : il n'y a pas de restitution physique d'un quelconque champ sonore, contrairement aux systèmes d'enceintes évoqués précédemment. Toutefois, même si l'approche de Fletcher reste aujourd'hui inégalée en termes de fidélité, tant pour le respect des timbres que pour le rendu spatial, elle nécessite *de facto* un enregistrement préalable à la restitution. Elle ne peut donc pas être interactive. Ainsi, ce procédé n'est pas utilisable dans des conditions de réalité virtuelle, où le système doit être dynamique, avec une adaptation en temps réel aux positions des sources et de l'auditeur.

Aussi, depuis les années 2000, avec l'essor de la puissance des ordinateurs, une

seconde méthode – la synthèse binaurale – a vu le jour dans de nombreux laboratoires, en France (l'Ircam, le Laboratoire d'acoustique musicale, France Telecom, consortium Bili, etc.) et à l'étranger (institut Fraunhofer en Allemagne, université de Californie à Davis, projet Orpheus, etc.). Afin de la mettre en œuvre, il faut d'abord déterminer les filtres HRTF d'un sujet (ou d'un mannequin de morphologie suffisamment proche). Pour ce faire, on place ce dernier au centre d'une sphère de plusieurs mètres de diamètre sur laquelle sont répartis des haut-parleurs. Pour chacun de ces émetteurs sonores, on mesure le son capté par des microphones placés dans les oreilles du sujet. De l'ensemble de ces mesures on déduit les fonctions HRTF.

Vient ensuite la synthèse binaurale proprement dite : si l'on veut donner à l'auditeur la sensation qu'un son provient d'une direction donnée, il suffit de traiter le son en question avec le filtre HRTF correspondant à cette direction. Pour un son numérisé, cela revient à effectuer un calcul sur ce son et à transmettre le résultat au casque de l'auditeur.

De longues mesures expérimentales...

Ainsi, par cette méthode, tout contenu sonore peut être spatialisé, au prix d'un effort de calcul. Mais la tâche reste raisonnable, car le traitement numérique est réalisable sur un ordinateur standard, voire un téléphone mobile. De plus, lorsqu'on effectue ledit calcul en temps



© DR

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.