

**LA RÉALITÉ
VIRTUELLE
EST UN OUTIL
ESSENTIEL
À LA RECHERCHE
SUR LA PERCEPTION,
EN PARTICULIER
AUDITIVE**

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.

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.

L'ESSENTIEL

● La harpe est un instrument complexe : le nombre de cordes important et les tensions qu'elles exercent influent sur le son de l'instrument. De plus, la vibration d'une corde entraîne celle de ses voisines.

● Ces divers phénomènes vibratoires sont étudiés par les physiciens qui en identifient les caractéristiques principales.

● Ils peuvent alors mettre au point des outils d'aide à la facture instrumentale, par exemple la carte d'admittance qui révèle le couplage entre les cordes et la table d'harmonie où elles sont fixées.

● Ils analysent également les interactions des doigts et des cordes, caractéristiques de chaque instrumentiste.

LES AUTEURS



FRANÇOIS GAUTIER
professeur au Laum (CNRS) et à l'École nationale supérieure d'ingénieurs du Mans.



JEAN-LOÏC LE CARROU
Maître de conférences à l'institut Jean-Le-Rond-d'Alembert (CNRS) de Sorbonne Université.

Dans les cordes d'une harpe

Selon un proverbe irlandais du XII^e siècle, tout gentilhomme devait avoir un coussin sur sa chaise, une femme vertueuse et une harpe bien accordée. Les physiciens peuvent aider... pour l'instrument.

L

e 9 mars 1967, un étrange instrument de « musique » est inventé... par Gaston Lagaffe dans le journal *Spirou*. Ce gaffophone tient plus de l'engin de démolition par les nombreux dégâts que ses vibrations ont entraînés que de la harpe dont il est pourtant une sorte d'avatar. Quelques amateurs se sont

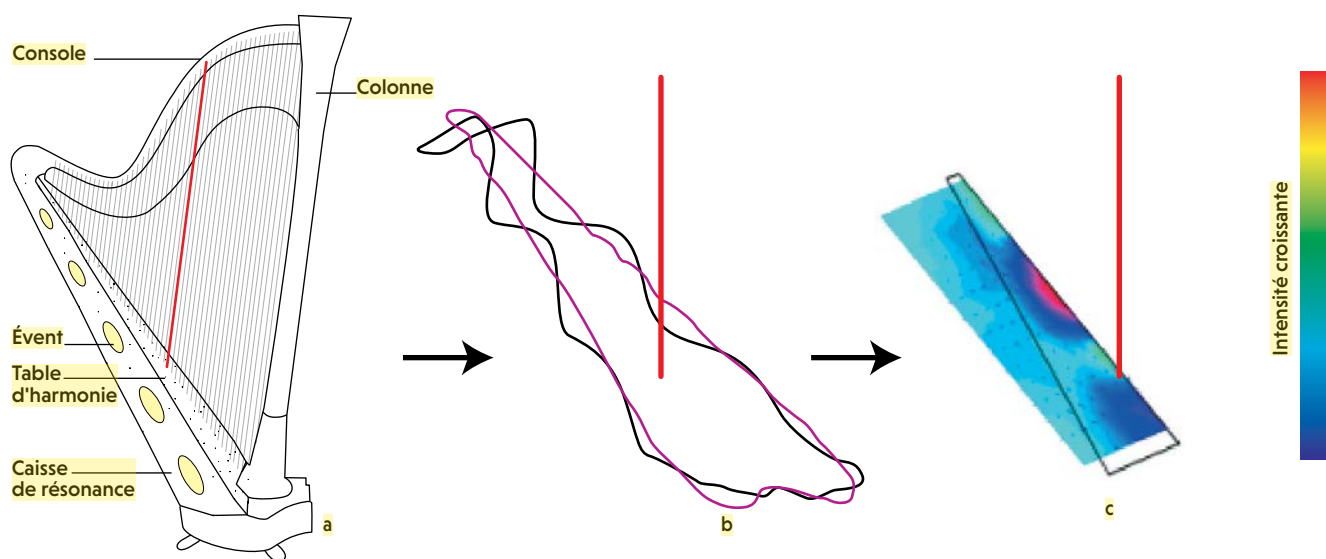
risqués à construire de vrais gaffophones, mais aucun n'a intégré d'orchestre symphonique, les harpistes préférant sans doute des instruments dont la qualité a fait ses preuves, notamment ceux de facteurs renommés.

DES GAFFOPHONES DE QUALITÉ

Ces instruments haut de gamme sont le plus souvent fabriqués de façon artisanale. Mais comment définit-on la qualité d'un instrument ? Il s'agit d'une notion globale qui recouvre le rendu sonore, l'expressivité ou la facilité de jeu, et associe des critères d'ergonomie, de solidité, de tenue dans le temps, notamment en ce qui concerne l'accord de l'instrument. Certains de ces attributs sont objectifs, d'autres reposent sur la perception subjective de l'instrument par l'auditeur. Pourtant, les implications économiques font de la qualité un enjeu majeur, car elle justifie souvent des différences de prix notables.

Les instruments de musique résultent d'un processus d'optimisation, par approximations ▶





successives, sur lequel les contraintes économiques pèsent en permanence. Par exemple, aujourd'hui, les accords internationaux de protection de la faune et de la flore limitent entre autres les prélèvements de pernambouc (un bois brésilien) pour les archets ou de palissandre pour les guitares et les percussions. Pour contourner ces obstacles, les constructeurs ont besoin de matériaux alternatifs et d'innovations qui ne peuvent venir que d'outils scientifiques. Ils sont aussi nécessaires pour améliorer la compétitivité des entreprises artisanales. Cela place l'étude de la physique des instruments de musique au cœur d'un processus conduisant à une facture performante.

UN MODÈLE À CORDES

Les instruments à cordes sont classés selon la façon dont le son est produit : on distingue ainsi les instruments pour lesquels des sollicitations sont entretenues (la corde frottée du violon) et ceux à cordes libres qui peuvent être frappées (le piano) ou pincées (la harpe ou la guitare). Dans ce dernier cas, les oscillations résultent d'une perturbation de l'état initial et constituent un phénomène quasi périodique, s'amortissant avec le temps. Rappelons que les vibrations d'une corde sont la superposition de contributions élémentaires, nommées modes, dont les fréquences sont des multiples entiers d'une fréquence dite fondamentale. Chaque mode de vibration est doté de caractéristiques, tels sa fréquence propre et son coefficient d'amortissement qui traduit la rapidité avec laquelle la corde retrouve son état initial (avant pincement).

Le rôle du luthier est de concevoir un dispositif mécanique robuste qui transforme en son la vibration de la corde. En effet, la corde est, seule, quasi incapable de mettre en

mouvement l'air, et ainsi de créer un son audible. Elle est donc associée à un système vibrant plan, une plaque nommée table d'harmonie (voir la figure ci-dessus). Cet élément a un rôle essentiel, celui du rayonnement acoustique, mécanisme par lequel la structure vibrante (principalement la table) transmet son mouvement à l'air environnant, mouvement ensuite propagé de proche en proche jusqu'à nos oreilles.

Cependant, pour une plaque seule, les rayonnements des deux faces créent des contributions presque opposées qui ont tendance à s'annuler. L'introduction d'une cavité diminue ce phénomène de court-circuit acoustique en réduisant le rayonnement de la face arrière de la plaque. Enfin, l'aménagement de trous dans cette cavité, des ouïes ou des événements, produit une résonance des basses fréquences qui augmente l'importance du champ rayonné dans ce registre de fréquences. La plupart des instruments à cordes sont construits sur ce modèle, dont nombre de paramètres sont ajustables par le luthier. Le choix de l'artisan est un équilibre entre son intuition et des règles issues de l'analyse du fonctionnement acoustique des instruments.

Examinons maintenant une harpe. Connue depuis l'Antiquité sous sa forme actuelle (elle est représentée sur un sceau sumérien), elle a néanmoins beaucoup évolué et donné lieu à de multiples modèles sur les différents continents selon la forme, la taille et le nombre de cordes. La grande harpe, ou harpe de concert, utilisée dans l'orchestre symphonique, est constituée de 47 cordes, fixées entre la console, en haut, et la table d'harmonie, en bas. Cette dernière est constituée d'une plaque faite généralement de bois d'épicéa, plus rarement en carbone,

La production d'un son avec une harpe se déroule selon plusieurs étapes : le doigt excite la corde (a, en rouge) qui communique son mouvement à la table d'harmonie (b, en noir) et crée un rayonnement sonore, visible sur la carte d'intensité acoustique (c).