

POUR LA SCIENCE HORS-SERIE

Edition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT!



N° 88 (juil. 15)
réf. DO088



N° 89 (oct. 15)
réf. DO089



N° 90 (janv. 16)
réf. DO090



N° 91 (avr. 16)
réf. DO091



N° 92 (juil. 16)
réf. DO092



N° 93 (oct. 16)
réf. DO093



N° 94 (janv. 17)
réf. DO094



N° 95 (avr. 17)
réf. DO095



N° 96 (août 17)
réf. DO096



N° 97 (nov. 17)
réf. DO097



N° 98 (févr. 18)
réf. DO098



N° 99 (mai 18)
réf. DO099

RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR/HORS-SERIE.HTML

À retourner accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr

☒ **OUI, je commande des numéros de Pour la Science Hors-série, au tarif unitaire de 10,90 €.**

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ x 10,90 € = 1090 €

2^e réf. _____ x 10,90 € = _____ €

3^e réf. _____ x 10,90 € = _____ €

4^e réf. _____ x 10,90 € = _____ €

5^e réf. _____ x 10,90 € = _____ €

6^e réf. _____ x 10,90 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Offre valable jusqu'au 31/12/2018 en France Métropolitaine. Pour une livraison à l'étranger, merci de consulter boutique.pourlascience.fr

Les informations que nous collectons dans ce bon de commande nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls> Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z



PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE
ABONNEZ-VOUS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

Un son en trois dimensions

Essentielle aux jeux vidéo et aux home cinémas, la spatialisation du son consiste à créer l'illusion que des sons proviennent de diverses directions et à organiser ainsi des scènes sonores en trois dimensions. Un domaine en plein essor.

B

ien installé dans votre fauteuil, vous savourez: les cuivres se font entendre à votre droite, les bois suivent à gauche, avant de laisser place aux ensembles de cordes droit devant vous. Incroyable cette nouvelle philharmonie parisienne avec son acoustique presque parfaite ! Pourtant, vous n'êtes pas dans ce nouveau lieu dédié à la musique symphonique, vous

êtes... dans votre canapé, à écouter de la musique *via* votre tout nouveau système de home cinéma.

C'est en tout cas ce que vantent les publicités pour les systèmes de «son 3D». Y a-t-il tromperie sur la marchandise? Non, mais la spatialisation du son proposée par les équipements audio grand public est loin d'être parfaite. En conséquence, ce domaine de recherche est en plein essor. Au fait, de quoi parle-t-on?

JEUX VIDÉO ET HOME CINÉMA

La spatialisation du son rassemble les techniques de contrôle de la direction apparente de provenance des sons et la simulation ou la modification des effets acoustiques d'une salle de concert. L'introduction des techniques électroacoustiques en musique, au cours du xx^e siècle, a >

L'ESSENTIEL

- La perception auditive spatiale dépend de caractéristiques physiologiques et d'un traitement cognitif.

- La spatialisation du son autorise des expériences de réalité augmentée et de nouvelles façons d'écouter, notamment sur les appareils mobiles.

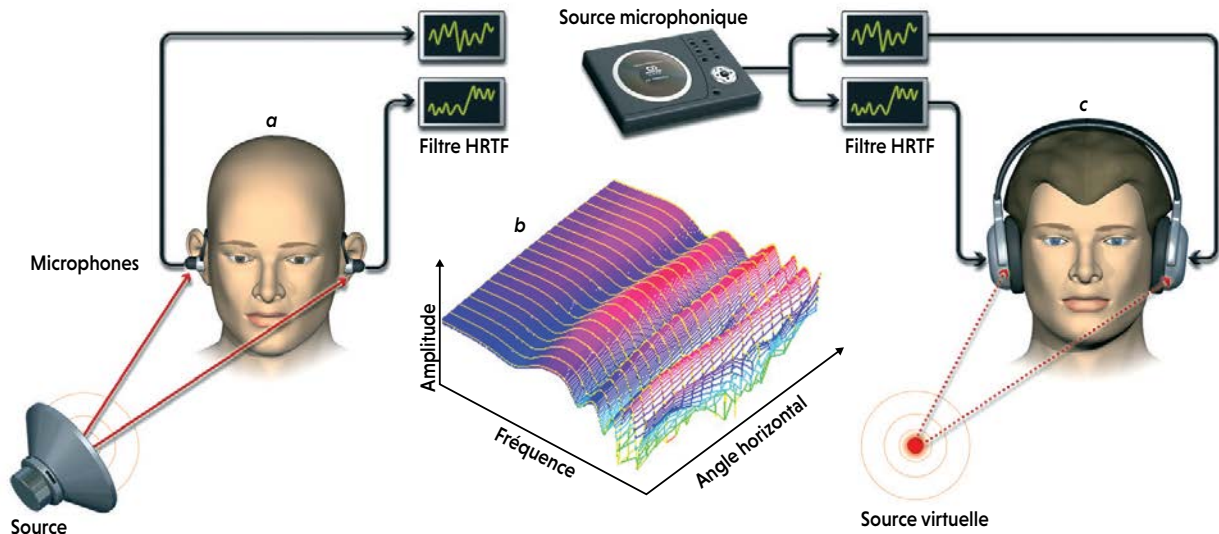
- La technique binaurale restitue l'illusion d'un son spatialisé dans un casque à l'aide de filtres encodant l'effet des directions de provenance.

- L'holophonie consiste à reconstruire le champ acoustique voulu dans toute une région de l'espace.

L'AUTEUR



OLIVIER WARUSFEL est chargé de recherche à l'Ircam, où il dirige l'équipe Acoustique des salles.



➤ considérablement enrichi le répertoire des timbres, mais aussi la mise en scène des sons dans l'espace. La spatialisation du son est devenue un aspect incontournable de la création musicale. Grâce à l'outil informatique, il est désormais possible de placer et d'animer des sources sonores de façon arbitraire, dans n'importe quelle direction, et ainsi de prolonger la scène traditionnelle où se trouvent les instrumentistes.

En parallèle, la spatialisation du son a connu une percée fulgurante chez le grand public par le biais des dispositifs de son 3D pour le home cinéma ou les jeux vidéo. Dans ces derniers, une composante sonore spatialisée est essentielle pour accroître le réalisme et l'immersion du joueur dans l'environnement de synthèse.

Quel que soit leur domaine d'application, les procédés de spatialisation font appel à plusieurs disciplines : informatique, acoustique, traitement du signal, psychoacoustique ou encore cognition. La synthèse de la direction et de la distance des sources sonores, de la propagation du son, ainsi que sa reproduction s'appuient à la fois sur la modélisation physique des phénomènes en jeu et sur des modèles de la perception auditive spatiale.

D'OÙ VIENT CE SON ?

Intéressons-nous d'abord à la perception spatiale du son, à la base de diverses techniques de spatialisation du son. Contrairement à la vue, qui chez l'être humain, souffre d'un champ limité, l'audition couvre l'ensemble de l'espace. Notre capacité à localiser des sources sonores repose sur la comparaison entre les signaux parvenant à nos deux oreilles, qui dépendent bien sûr de la position de celles-ci, mais aussi de la diffraction des ondes acoustiques sur notre tête. Ces phénomènes dépendent de la direction d'incidence des ondes et permettent de localiser la source.

Les performances de localisation du système auditif humain en azimut (dans le plan

La restitution binaurale. Pour une source donnée, on mesure d'abord les différences de temps d'arrivée et d'amplitudes aux deux oreilles d'un auditeur (a). Ces différences, qui permettent de localiser la source sonore, sont caractérisées par une paire de filtres dits HRTF (b). On construit de même des filtres pour toutes les directions. Pour spatialiser un son monophonique, il suffit ensuite d'appliquer au signal émis la paire de filtres correspondant à la direction souhaitée : tout se passe comme si le son reconstruit venait d'une source virtuelle située au même endroit que la source réelle d'origine (c).

horizontal) sont de l'ordre de trois degrés pour des sources voisines du plan de symétrie de la tête. Elles tombent à une dizaine de degrés pour des sources situées sur le côté.

Comment fonctionne la localisation en azimut ? Les deux indices fondamentaux sont la différence entre les temps d'arrivée aux oreilles (ITD, pour *interaural time difference*), traduisant leur écartement, ainsi que la différence d'intensité (ILD, pour *interaural level difference*), liée à l'obstacle de la tête. Ces indices dits binauraux décrivent les relations entre les signaux captés par les deux oreilles. Toutefois, des considérations géométriques simples révèlent qu'à un couple de valeurs données des indices interauraux de retard et d'intensité correspondent plusieurs directions possibles. Ainsi, pour chaque direction dans le plan médian, les différences interaurales sont nulles. Des mécanismes plus fins sont nécessaires pour différencier les directions dans cette zone de confusion et plus généralement permettre la localisation en élévation.

En raison de l'interaction complexe des ondes sonores avec notre corps (diffraction par le crâne, le pavillon de l'oreille, les épaules...), les variations de différences d'intensité dépendent de la fréquence du son. Dans les basses fréquences, les longueurs d'onde – plusieurs mètres – sont grandes par rapport aux dimensions de la tête. Celle-ci n'est donc pas un obstacle majeur et la différence de niveau sonore entre l'oreille du côté de la source (ipsilatérale) et l'oreille opposée (controlatérale) est faible.

Plus la fréquence du son est élevée – plus sa longueur d'onde diminue –, plus les caractéristiques morphologiques contribuent à différencier les signaux parvenant aux deux oreilles. Ainsi, chaque direction d'incidence s'accompagne d'une « coloration spectrale » particulière du son, que notre cerveau apprend à identifier. En d'autres termes, la perception auditive spatiale consiste à décoder l'effet de notre propre perturbation sur

le champ d'ondes acoustiques. Les indices spectraux sont notamment sollicités pour discriminer les directions avant, arrière et, de façon plus générale, dans le plan vertical. La nature plus subtile de ces indices explique les performances assez médiocres de la localisation en élévation (angle vertical), de l'ordre de 10 degrés de face, jusqu'à 30 degrés vers le haut ou l'arrière.

La perception de la distance dépend de plusieurs facteurs. L'éloignement de la source entraîne une baisse de l'intensité sonore et une atténuation des hautes fréquences liée à l'absorption par l'atmosphère. Ces indices ne sont cependant pas absolus; ils supposent eux aussi un traitement cognitif fondé sur une connaissance préalable de la puissance et du spectre émis par la source. Lorsque nous identifions une voix, un véhicule..., nous en comparons le niveau et le timbre par rapport à d'autres événements du même type, dans diverses situations spatiales (proche, derrière...), gardés dans notre mémoire.

D'autres facteurs s'ajoutent dans le cas d'environnements réverbérants comme une salle, pour lesquels notre perception s'appuie sur le rapport entre l'intensité directe de la source, qui varie avec la distance, et l'intensité réverbérée, qui est uniformément répartie dans la salle.

Les systèmes de restitution sonore spatiale visent, de façon générale, à reproduire aux oreilles d'un auditeur les valeurs appropriées de ces indices de localisation selon la position souhaitée d'une source sonore virtuelle. Pour ces systèmes, on distingue trois familles: la stéréophonie et ses extensions, les techniques binaurales, réservées à la restitution sur casque, et les techniques de synthèse du champ acoustique. Au-delà de la fidélité avec laquelle elles reproduisent les indices de localisation, les mérites respectifs de ces différentes techniques se mesurent en termes de nombres de canaux à gérer et de contraintes sur la position et la mobilité de l'auditeur par rapport au dispositif de restitution.

EN HIFI ET EN STÉRÉO

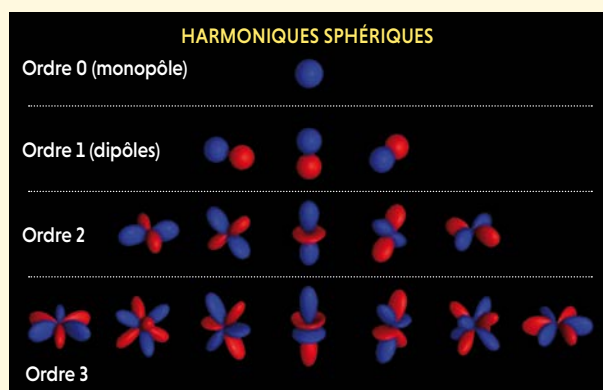
Le modèle de restitution spatiale du son le plus utilisé encore aujourd'hui reste la stéréophonie. Deux haut-parleurs sont placés devant l'auditeur. En jouant sur le retard ou le niveau relatif des signaux envoyés à chaque haut-parleur, on contrôle de façon simplifiée les indices de localisation interauraux (ITD et ILD), ce qui donne naissance à une source sonore fictive. La direction de cette «source fantôme» est limitée à la zone encadrée par les deux haut-parleurs. L'utilisation d'un simple retard entre les deux canaux aboutit à une zone de restitution très limitée. La plage de variation du retard pour laquelle les signaux fusionnent pour créer une image fantôme est en effet très restreinte. Dès que le retard dépasse une milliseconde (soit un décalage de 30 centimètres environ), le signal en retard est inhibé: il n'intervient plus dans le traitement perceptif de la localisation (effet Hass). En conséquence, un auditeur décalé, même légèrement, de l'axe médian des deux haut-parleurs aura l'illusion que l'ensemble de la scène stéréophonique se déporte de façon abrupte vers le haut-parleur le plus proche. L'utilisation conjointe d'une différence de gain contribue à limiter cet effet, sans toutefois le compenser totalement.

Par extension, il est possible de reproduire un son spatialisé sur des ensembles de haut-parleurs, plans ou tridimensionnels, disposés autour de l'auditeur. L'exemple le plus courant est la configuration «5.1» (cinq haut-parleurs répartis dans le plan horizontal) des formats sonores cinématographiques, également utilisés dans les jeux vidéo. Les installations sonores plus ambitieuses nécessitent la mise en place de dômes constitués de quelques dizaines de haut-parleurs. Pour synthétiser la direction d'une source sonore, on sélectionne la paire ou le triplet de haut-parleurs entourant la direction désirée et l'on règle les

LA DÉCOMPOSITION HARMONIQUE

La spatialisation par décomposition harmonique consiste à représenter l'organisation spatiale du champ acoustique d'un point de vue angulaire (sans notion de distance) sous forme d'une superposition de fonctions périodiques de l'espace, les harmoniques sphériques, chacune associée à un canal audio. L'harmonique d'ordre 0 (monopôle) correspond à une variation de pression homogène dans toutes les directions. Les harmoniques

d'ordre 1 (dipôles) caractérisent chacune un gradient de pression selon une des trois directions de l'espace. Les cinq harmoniques d'ordre 2, puis celles des ordres supérieurs, représentent des modes de vibration plus complexes; elles permettent de préciser de façon progressive la dépendance angulaire du champ acoustique. La description exacte de celle-ci requiert en théorie un nombre infini d'harmoniques, et donc de canaux.



- > gains et éventuellement les retards relatifs en fonction de la direction souhaitée.

Ces systèmes partagent toutefois les mêmes limitations: l'illusion d'une source fantôme n'est valide qu'en un point particulier de l'espace (au centre du dispositif) et, à l'instar des trompe-l'œil, l'auditeur ne peut s'écarter de cette position sous peine de déformations, voire de dissipation totale de l'illusion spatiale.

La technique binaurale, pour sa part, court-circuite toute connaissance et modélisation physique ou perceptive des phénomènes en jeu et se contente de reproduire la réalité: son principe est de reconstruire directement l'ensemble des indices de localisation à partir de mesures acoustiques effectuées sur une tête humaine.

Longtemps confinée au laboratoire, elle a aujourd'hui atteint un degré de maturité qui rend possible son utilisation dans des contextes grand public, tels le jeu ou les télécommunications. La technique binaurale repose sur une procédure d'analyse et de synthèse du son perçu dans plusieurs directions. On peut l'assimiler aux techniques d'échantillonnage très utilisées dans le domaine de la synthèse sonore, où la simulation d'un instrument (piano, trompette, orgue...) repose sur deux étapes: la constitution

préalable d'une banque de sons enregistrés, parfois note par note, sur de vrais instruments, puis la restitution simple ou faiblement modulée de ces sons lors du jeu sur l'instrument virtuel.

CASQUE OBLIGATOIRE

Dans le cas de la synthèse binaurale, la première étape ne consiste pas à enregistrer des sons spatialisés, mais à mesurer la transformation – ou filtrage – subie par une onde sonore au cours de sa propagation, de sa source jusqu'aux tympans d'un auditeur. Pour cela, on insère des microphones dans les conduits auditifs et on enregistre la réponse à un signal (en pratique, une impulsion) émis depuis une direction donnée. Ces mesures doivent se dérouler en chambre anéchoïque (sans écho) pour éviter les perturbations entraînées par la réflexion des parois. La réponse à cette impulsion élémentaire suffit à caractériser une fois pour toutes le couple de filtres (correspondant aux oreilles droite et gauche) associé à la direction d'incidence de l'onde sonore.

Ces filtres, connus sous le nom de «fonctions de transfert de la tête» ou HRTF (pour *head related transfer functions*), portent la trace de l'ensemble des phénomènes acoustiques

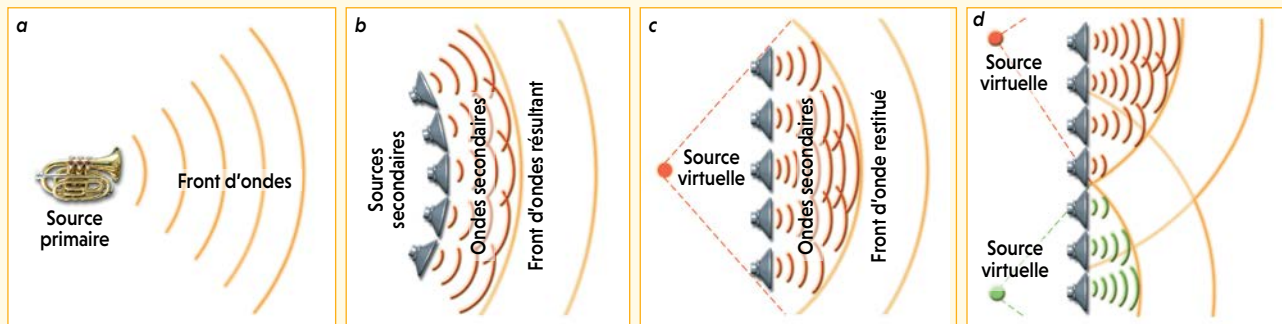
LA SYNTHÈSE DU CHAMP ACOUSTIQUE

L'holophonie ou synthèse du champ acoustique (WFS) s'appuie sur le formalisme ondulatoire de Huygens. À tout instant, chacun des points du front d'une onde originale d'une source primaire (a) peut être vu comme une source secondaire qui réémet une ondelette sphérique de même phase et de même amplitude. Un instant plus tard, l'enveloppe de ces ondelettes secondaires correspond au front d'onde de l'onde primaire (b). Pour

reconstruire une onde acoustique, il suffit ainsi de disposer d'un ensemble de sources secondaires. Le champ acoustique s'exprime comme la somme des ondes émises par un réseau de sources secondaires situées sur une surface fermée entourant la région de restitution, ou sur un plan infini séparant les sources de cette région. Pour que la reproduction du champ sonore soit exacte, il faut une distribution infinie et continue de sources secondaires.

En pratique, un réseau de haut-parleurs espacés de quelques dizaines de centimètres et disposés dans le plan des auditeurs joue le rôle des sources secondaires. En imprimant un décalage temporel (retard) et une variation d'amplitude (gain) au signal issu de la source primaire envoyé sur chaque haut-parleur, on crée un front d'onde cohérent qui semble provenir d'une source virtuelle (c), dont la position est identique pour tous les auditeurs. On peut de même

créer de multiples sources virtuelles (d). Le dispositif de synthèse du champ acoustique installé en front de scène à l'espace de projection de l'Ircam (e) permet de spatialiser le son en temps réel, et de jouer sur la localisation du son de l'instrument et du son électroacoustique pour créer un instrument «augmenté» en les fusionnant, ou au contraire, les dédoubler en créant un ou plusieurs instruments virtuels éloignés.



survenus durant la propagation du son. L'opération est répétée pour un grand nombre de directions, de façon à baliser toute la sphère auditive et constituer une base de données de filtres directionnels.

Par la suite, lors de la synthèse spatiale, il suffit d'appliquer à tout signal monophonique, par exemple une voix captée par un microphone, le couple de filtres correspondant à la direction de la source virtuelle souhaitée. Les deux signaux obtenus, diffusés dans un casque, restituent de façon exhaustive les indices acoustiques responsables de la localisation auditive spatiale, et ce pour n'importe quelle direction présente dans la base de données.

Cette technique est réservée à la restitution sur un casque, faute de quoi, lors de la diffusion, le filtrage propre au trajet entre les enceintes et les oreilles de l'auditeur se superpose au filtre choisi et perturbe l'illusion sonore. En adaptant «en temps réel» le couple de filtres appliqué en fonction de la direction de la source ou des mouvements de l'auditeur, on obtient sans peine une source fictive en mouvement.

La synthèse binaurale partage les mêmes limites que l'échantillonnage: ne reposant sur aucune modélisation, elle se prête mal aux manipulations. Elle nécessite par exemple la constitution d'une lourde banque de filtres. En effet, bien qu'il soit possible de reconstruire une direction manquante par interpolation entre deux directions voisines, celles-ci ne doivent pas être éloignées de plus de 15 degrés sous peine de voir apparaître des effets indésirables. La reproduction de sources en mouvement nécessite même des mesures tous les cinq degrés environ, ce qui conduit à des bases de données de l'ordre de 200 à 600 couples de filtres pour couvrir l'ensemble des directions.

En outre, les filtres HRTF dépendent par nature de la morphologie de l'auditeur. Ainsi, l'utilisation de filtres «génériques», mesurés sur une tête artificielle, entraîne en général des erreurs de localisation, en particulier des confusions avant-arrière.

Cependant, le couplage d'un dispositif de synthèse binaurale avec un capteur d'orientation de la tête permet d'asservir de façon continue la scène sonore diffusée aux mouvements de l'auditeur. Cette rétroaction est déterminante pour l'auditeur, puisqu'elle lui permet de rétablir la corrélation entre ses propres mouvements et les variations des indices acoustiques transmis et réduit de façon considérable les confusions avant-arrière.

La technologie binaurale reste à ce jour le mode de restitution spatiale le plus rigoureux, et son utilisation se justifie non seulement dans le cadre d'études sur la perception et la cognition

auditive spatiale, mais également sur le terrain du jeu ou des installations sonores interactives.

Enfin, des approches plus récentes de la reproduction sonore s'attachent à modéliser et à reconstruire de façon précise les propriétés physiques du champ acoustique dans une zone plus ou moins large autour des auditeurs, en s'appuyant sur la résolution de l'équation d'onde. Parmi ces méthodes, on distingue les techniques holophoniques comme la *wave field synthesis* (WFS) et les approches par «décomposition harmonique», comme les formats Ambisonics. Développée dans les années 1980 à l'université de Delft, aux Pays-Bas, la WFS suscite aujourd'hui un large intérêt, car le grand nombre de canaux (jusqu'à plusieurs centaines) que nécessite cette technique de synthèse spatiale n'est plus un obstacle technique.

JOUER AVEC LES FRONTS D'ONDE

Le signal sonore d'une source primaire que l'on désire spatialiser est diffusé sur un réseau de haut-parleurs très proches les uns des autres.

Sous certaines conditions, la juxtaposition des fronts d'onde émis par chacune de ces sources secondaires est alors équivalente au front d'onde d'une unique onde acoustique, provenant d'une source primaire virtuelle. Un contrôle adéquat du retard temporel et de l'intensité du signal envoyé sur chaque haut-parleur permet d'obtenir la création d'un front d'onde commun qui a pour origine n'importe quelle position souhaitée (voir l'encadré page ci-contre). Ce traitement doit être répété de façon indépendante pour chaque source composant la scène sonore.

En toute rigueur, la reproduction exacte du champ acoustique requiert une infinité de sources secondaires. En pratique, on se limite à créer des sources virtuelles dans le plan horizontal des auditeurs. Les sources secondaires sont alors elles-mêmes placées dans ce plan, et moyennant quelques termes correctifs, il suffit d'installer des haut-parleurs le long d'une couronne autour des auditeurs, ou d'une rangée devant eux.

De même, la distribution en théorie continue de sources secondaires est remplacée par un nombre fini de haut-parleurs régulièrement espacés. Cette discrétisation se traduit par une dégradation de la qualité de restitution spatiale dans les hautes fréquences. En pratique, pour assurer que l'indice interaural de retard soit reproduit de façon fiable dans la gamme de fréquences où il est primordial et sur l'ensemble de la région d'écoute, la fréquence limite est fixée au-dessus d'un kilohertz, ce qui conduit à un écartement maximal des haut-parleurs de l'ordre de 15 centimètres.

Si la stéréophonie s'appuie sur un modèle centré sur l'auditeur, la WFS adopte au contraire un point de vue exocentrique: le champ sonore

L'holophonie
ou synthèse du champ
acoustique s'appuie sur
le formalisme ondulatoire
de Huygens

> 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.



**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 voisins.
- 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 ➤