

- > 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

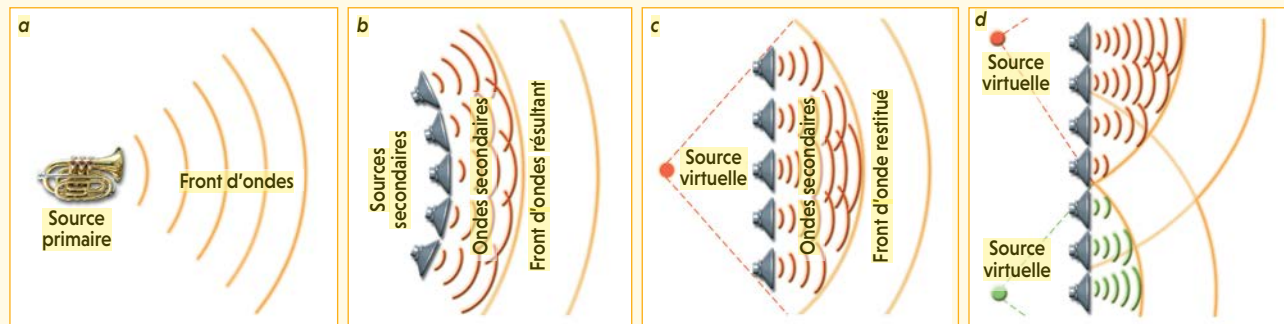
LA SYNTHÈSE DU CHAMP ACOUSTIQUE

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**