

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