

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

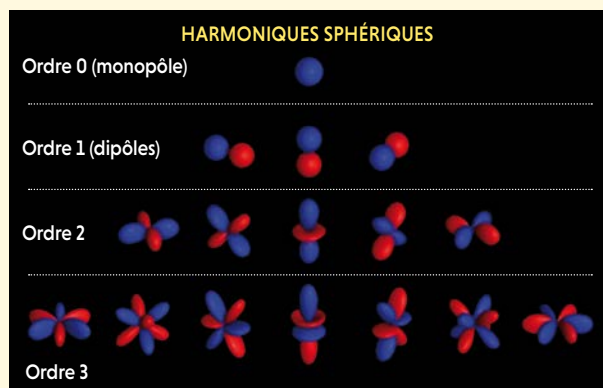
Le modèle de restitution spatiale du son le plus utilisé encore aujourd'hui reste la stéréophonie. Deux haut-parleurs sont placés devant l'auditeur. En jouant sur le retard ou le niveau relatif des signaux envoyés à chaque haut-parleur, on contrôle de façon simplifiée les indices de localisation interauraux (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.

