

La simulation numérique au service du son 3D

Matthieu Aussal et François Alouges

Un univers sonore comme si vous y étiez, mais avec un simple casque d'écoute : grâce notamment à des méthodes efficaces pour résoudre numériquement certaines équations, ce rêve des techniques de réalité virtuelle se concrétise enfin.



L'ESSENTIEL

- On cherche à reproduire fidèlement et en temps réel des scènes sonores, de façon que l'auditeur, muni d'un simple casque, perçoive la direction et la distance de chacune des sources de sons.
- Cela nécessite entre autres la détermination de fonctions, nommées HRTF, qui caractérisent l'influence de la forme de la tête et des oreilles de l'auditeur sur le son perçu.
- On sait aujourd'hui calculer avec efficacité ces fonctions, plutôt que les mesurer en laboratoire, ce qui est fastidieux et coûteux.

© Eshkin / Shutterstock.com

Avec la révolution numérique, des techniques qui relevaient autrefois de la science-fiction s'introduisent dans nos vies et se banalisent rapidement. Il en est ainsi de la visualisation de scènes en relief, ou visualisation 3D. Une décennie a suffi pour que les cinémas, suivis de la télévision ou des jeux vidéo, soient conquis, et l'on a assisté à l'essor de casques de réalité virtuelle qui immergent leur porteur dans une scène visuelle d'aspect réaliste où il peut se déplacer. Même si des applications autres que récréatives (conception assistée par ordinateur, aide au diagnostic médical, entraînement de chirurgiens, etc.) sont encore en développement, le potentiel de

■ LES AUTEURS



Matthieu AUSSAL est ingénieur de recherche au Centre de mathématiques appliquées (CMAP) de l'École polytechnique, à Palaiseau.

François ALOUGES est professeur de mathématiques appliquées au CMAP.

Matthieu Aussal a reçu en 2015 le prix AMIES (Agence pour les mathématiques en interaction avec l'entreprise et la société) pour sa thèse de doctorat.

LE SYSTÈME WAVE FIELD SYNTHESIS (WFS), ou Synthèse de front d'ondes, ici celui de l'Ircam à Paris, utilise un grand nombre de haut-parleurs pour créer dans l'espace des « hologrammes sonores », c'est-à-dire des sources virtuelles donnant l'impression que c'est d'elles, et non des haut-parleurs, qu'émane le son.

ces systèmes laisse peu de doutes quant à leur avenir.

Ces casques de visualisation immersive commencent à livrer des informations acceptables et persuasives pour notre système visuel. Mais il n'en est pas de même pour ce qui est des informations fournies à notre système auditif.

De quoi s'agit-il ? Au même titre que nos yeux nous permettent de voir en trois dimensions, nos oreilles nous fournissent, inconsciemment et en continu, des informations spatiales contenues dans le son, notamment sur la position et le mouvement des sources sonores. Lorsque ces informations auditives sont absentes, voire contradictoires avec les informations visuelles, notre système cognitif le supporte mal. Parfois, il supprime même l'illusion offerte par le dispositif de réalité virtuelle, ce qui rend désagréable l'expérience vécue par l'utilisateur et peut même provoquer des nausées.

La compréhension des mécanismes physiques et physiologiques de la spatialisation sonore est donc indispensable pour offrir une expérience immersive, complète et persuasive de réalité virtuelle : s'il est facile de comprendre que nos deux yeux voient la même scène d'un point de vue légèrement différent, il est beaucoup plus difficile de savoir ce qu'entend exactement chacune de nos oreilles lorsque nous sommes plongés dans une scène sonore.

Parmi les nombreuses recherches consacrées à ce sujet, l'une des démarches consiste à simuler par ordinateur, à l'aide de modèles mathématiques, la propagation des ondes sonores, de la source du son jusqu'au

conduit auditif de l'oreille. Ces simulations numériques, qui sont l'objet du présent article, peuvent en effet livrer des résultats comparables à ceux des mesures effectuées en laboratoire, mais avec davantage de souplesse et de répétabilité, pour un coût modique. Ces « expériences numériques » autorisent la confrontation d'hypothèses, la validation ou l'invalidation de modèles, et fournissent des données utiles pour les applications destinées au grand public.

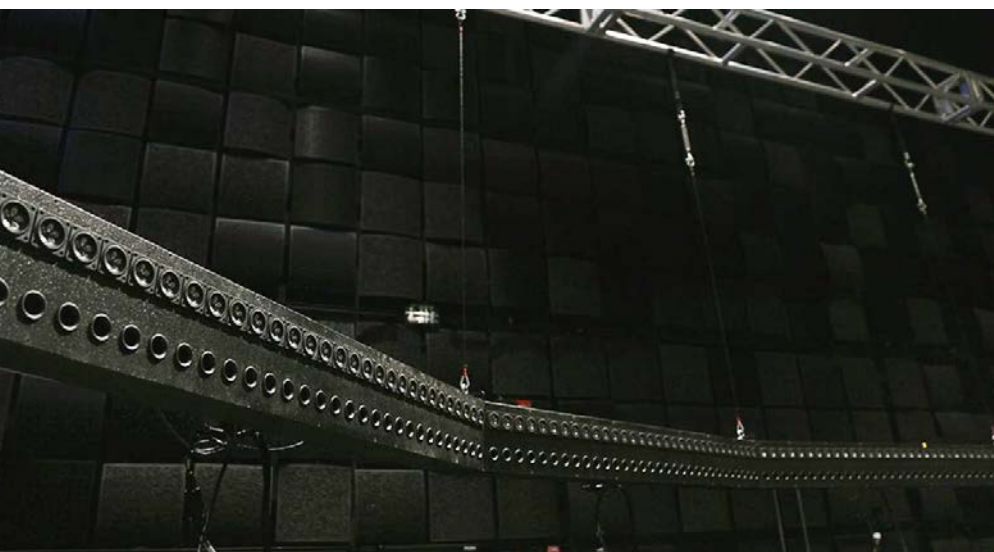
Pour mieux comprendre l'intérêt des recherches sur le son 3D et l'approche par la simulation numérique, rappelons qu'il existe déjà sur le marché des dispositifs réalisant une spatialisation du son, au moyen d'un ensemble de haut-parleurs diffusant chacun un canal sonore approprié. Les chaînes *home cinema* 5.1 ou 7.1, voire les 64 canaux proposés par le système Atmos de Dolby, en sont des exemples. Ces dispositifs permettent de positionner virtuellement des objets sonores autour de l'auditeur, en jouant par exemple sur des différences d'intensité entre les haut-parleurs, des effets de retard ou de réverbération. C'est une sorte de généralisation du système de stéréophonie bien connu.

Un rendu spatial avec juste un casque

D'autres techniques plus récentes, telles que la HOA (*High Order Ambisonics*, « ambisonie d'ordre élevé ») ou la WFS (*Wave Field Synthesis*, ou « synthèse de front d'ondes »), fonctionnent sur des principes équivalents, quoique plus complexes dans leur formalisme mathématique.

Cependant, tous ces systèmes sont confrontés à la même limitation : la précision du rendu spatial est directement proportionnelle au nombre d'enceintes. Ils restent donc encombrants, malgré les efforts de miniaturisation. Aussi, bien que ces dispositifs soient tout indiqués pour équiper de grands volumes (salles de cinéma, auditoriums, salles de spectacle, etc.), ils sont incompatibles avec la portabilité et la mobilité des casques de réalité virtuelle. Il faut donc se tourner vers la technique de spatialisation sonore adaptée, à savoir la « synthèse binaurale » sur casque audio.

L'écoute binaurale désigne les perceptions auditives engendrées par une stimulation sonore des deux oreilles. L'idée de la synthèse binaurale est donc de synthétiser le son adéquat destiné à chaque oreille.



Lorsqu'un son est émis dans l'espace, il arrive généralement un peu plus tôt et avec une intensité un peu plus élevée à l'une des deux oreilles (voir la figure ci-contre). Cela fournit à notre système cognitif deux indices sur la direction de la source émettrice. On les nomme ITD (*Interaural Time Delay*, « différence interaurale de temps ») et ILD (*Interaural Level Difference*, « différence interaurale d'intensité »).

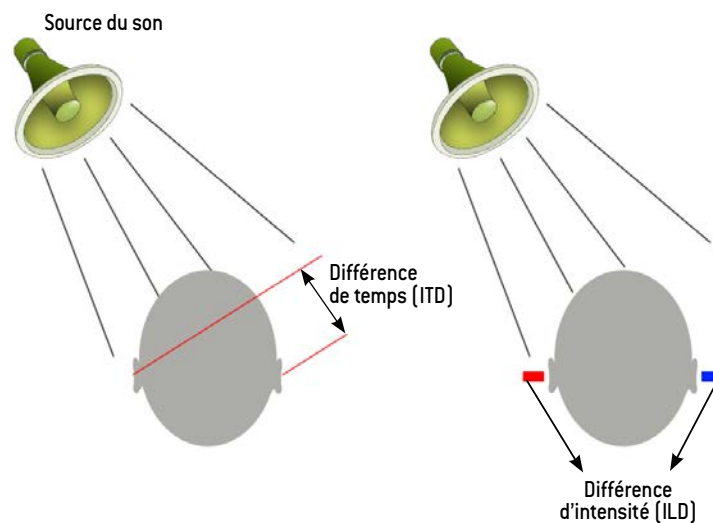
Mais ces indices de localisation sont insuffisants. Par exemple, ils ne permettent pas de différencier la provenance de sources sonores situées à la même distance des deux oreilles, c'est-à-dire dans le plan sagittal qui passe entre les oreilles. Pourtant, nous sommes capables de discriminer efficacement de telles sources sonores, provenant du dessus, de devant, de derrière, etc. Comment fait notre cerveau ?

Pour l'expliquer, il faut d'abord savoir que tout son peut être vu comme une superposition d'ondes acoustiques sinusoïdales, et que la propagation d'une telle onde dans un milieu est perturbée par les détails géométriques des obstacles qu'elle rencontre.

Ce phénomène de diffraction dépend de la longueur d'onde (distance entre deux pics successifs de l'onde sinusoïdale considérée). Des détails géométriques petits par rapport à la longueur d'onde modifient peu la propagation : l'onde correspondante n'y est pas sensible. Inversement, des détails géométriques de taille comparable ou supérieure à la longueur d'onde modifient notablement la propagation et perturbent l'acoustique. C'est d'autant plus le cas quand la forme de l'objet est complexe, comme pour le pavillon de l'oreille.

La forme de la tête et des oreilles joue

Lorsqu'un son émis par une source se propage jusqu'au tympan, la forme de la tête et des oreilles de l'auditeur diffractent toutes ses composantes dont les longueurs d'onde sont, pour l'essentiel, inférieures au mètre. En termes de fréquences, cela se traduit par une modification du spectre pour toutes les fréquences supérieures à quelques centaines de hertz – c'est-à-dire une modification des amplitudes et phases des ondes correspondant à ces fréquences. Il s'ensuit que les différents tons qui composent le signal sonore initial



LA DIRECTION DE LA SOURCE SONORE se traduit dans divers indices physiques dont se sert le cerveau pour la déterminer. Deux d'entre eux sont la différence interaurale de temps (ITD) et la différence interaurale d'intensité (ILD), qui mesurent les différences, entre les deux oreilles, du temps d'arrivée du son et du niveau perçu.

seront perçus avec des intensités relatives différentes de celles de l'émission. Or deux sons provenant d'endroits différents ne rencontrent pas les mêmes obstacles et les mêmes détails. Ils sont donc modifiés différemment. Ce troisième indice, judicieusement exploité par notre cerveau, vient compléter la panoplie perceptive et enrichit profondément notre capacité à localiser les sons dans tout l'espace.

Par extension, deux personnes ayant des morphologies – en particulier d'oreilles – différentes n'entendent pas de la même façon, surtout dans les hautes fréquences. Ainsi, chacun a son propre univers sonore !

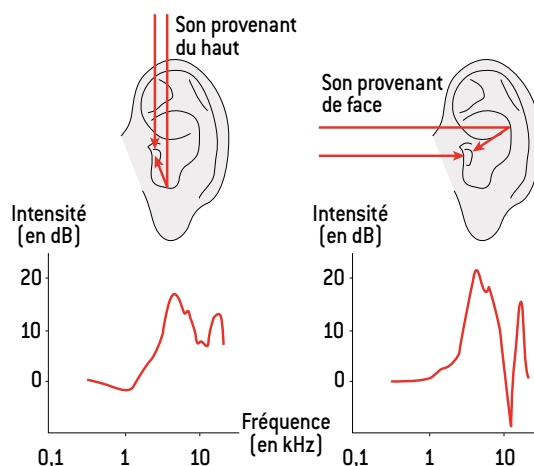
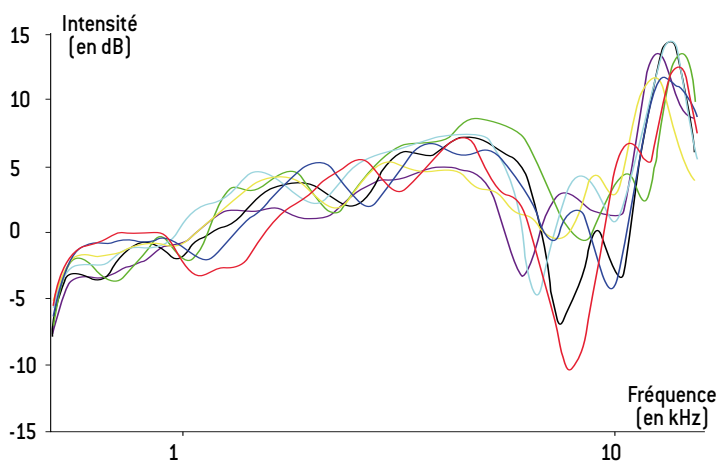
Du théâtrophone à la synthèse binaurale

En synthèse binaurale, on cherche à exploiter les indices de localisation portés par l'ITD, l'ILD et les déformations fréquentielles que nous venons de mentionner. Ces trois indices sont codés dans un ensemble de fonctions nommées HRTF (*Head-Related Transfer Functions*, c'est-à-dire « fonctions de transfert relatives à la tête »).

Plus précisément, les fonctions HRTF relient, pour chaque fréquence sonore et chaque direction d'incidence, la pression acoustique à l'entrée du canal auditif à la pression acoustique que l'on mesurerait en l'absence de l'auditeur, au milieu du volume qu'occuperait la tête de ce dernier. Ces fonctions constituent des « filtres », qui caractérisent mathématiquement les transformations acoustiques dues à la morphologie de la tête, et sur la base desquelles on réalise la synthèse binaurale.

Fréquence et longueur d'onde

La fréquence f est liée à la longueur d'onde λ par la relation $f = c/\lambda$, où c est la vitesse de propagation. Pour le son, cette vitesse est égale, dans l'air, à 340 mètres par seconde.



POUR UNE DIRECTION D'INCIDENCE donnée, le son qui parvient au pavillon de l'oreille dépend de la morphologie de la tête de l'auditeur et de son pavillon (à gauche, différentes courbes correspondant à différents

auditeurs). Les variations sont plus importantes pour les sons aigus (plus de 1 kHz). Pour un même individu, on a aussi des variations selon la direction d'incidence (graphiques de droite).

Avant d'expliquer plus précisément en quoi consiste la synthèse binaurale, on peut retracer brièvement sa préhistoire. La première expérience de spatialisation sonore remonte à la fin du XIX^e siècle, avec le théâtrophone (1881) de Clément Ader. Il s'agissait du premier service de retransmission en direct de spectacles, combinant à la fois téléphonie et stéréophonie (voir l'illustration ci-dessous).

Dans les années 1930, l'ingénieur britannique Alan Blumlein introduisit l'enregistrement stéréophonique, tandis que le physicien américain Harvey Fletcher déposa un brevet décrivant un système de téléphone binaural.

L'idée du système de Fletcher était d'utiliser une tête artificielle pour effectuer une prise de son binaurale, à l'aide d'un microphone placé au creux du pavillon de chaque oreille du mannequin, ce dernier devant imiter au mieux la morphologie humaine. Les ondes sonores sont alors diffractées par les détails morphologiques du mannequin, et le son ainsi transformé est enregistré par les microphones. Cet enregistrement stéréophonique particulier peut ensuite être écouté sur n'importe quel casque audio, ce qui donne un résultat souvent spectaculaire (écouter par exemple *Virtual Barber Shop*, sur www.youtube.com/watch?v=IUDTlvagjJA).

LE THÉÂTROPHONE conçu par Clément Ader retransmettait le son capté par deux microphones placés sur la scène de l'opéra ou du théâtre : une sorte de stéréophonie en direct, par téléphone.

Il faut souligner que la sensation d'espace procurée par le dispositif de Fletcher est uniquement perceptive : il n'y a pas de restitution physique d'un quelconque champ sonore, contrairement aux systèmes d'enceintes évoqués précédemment. Toutefois, même si l'approche de Fletcher reste aujourd'hui inégalée en termes de fidélité, tant pour le respect des timbres que pour le rendu spatial, elle nécessite *de facto* un enregistrement préalable à la restitution. Elle ne peut donc pas être interactive. Ainsi, ce procédé n'est pas utilisable dans des conditions de réalité virtuelle, où le système doit être dynamique, avec une adaptation en temps réel aux positions des sources et de l'auditeur.

Aussi, depuis les années 2000, avec l'essor de la puissance des ordinateurs, une

seconde méthode – la synthèse binaurale – a vu le jour dans de nombreux laboratoires, en France (l'Ircam, le Laboratoire d'acoustique musicale, France Telecom, consortium Bili, etc.) et à l'étranger (institut Fraunhofer en Allemagne, université de Californie à Davis, projet Orpheus, etc.). Afin de la mettre en œuvre, il faut d'abord déterminer les filtres HRTF d'un sujet (ou d'un mannequin de morphologie suffisamment proche). Pour ce faire, on place ce dernier au centre d'une sphère de plusieurs mètres de diamètre sur laquelle sont répartis des haut-parleurs. Pour chacun de ces émetteurs sonores, on mesure le son capté par des microphones placés dans les oreilles du sujet. De l'ensemble de ces mesures on déduit les fonctions HRTF.

Vient ensuite la synthèse binaurale proprement dite : si l'on veut donner à l'auditeur la sensation qu'un son provient d'une direction donnée, il suffit de traiter le son en question avec le filtre HRTF correspondant à cette direction. Pour un son numérisé, cela revient à effectuer un calcul sur ce son et à transmettre le résultat au casque de l'auditeur.

De longues mesures expérimentales...

Ainsi, par cette méthode, tout contenu sonore peut être spatialisé, au prix d'un effort de calcul. Mais la tâche reste raisonnable, car le traitement numérique est réalisable sur un ordinateur standard, voire un téléphone mobile. De plus, lorsqu'on effectue ledit calcul en temps



réel, la spatialisation peut tenir compte à la fois de la position de l'auditeur, de celle de la source sonore et de leur orientation relative. En cela, la synthèse binaurale est parfaitement adaptée aux systèmes de réalité virtuelle.

La synthèse binaurale semble attrayante, mais plusieurs difficultés expliquent qu'elle peine à se concrétiser en dehors des laboratoires de recherche.

Tout d'abord, les mesures des filtres HRTF sont par nature discrètes, ponctuelles: elles ne couvrent pas tout l'espace, car on n'a évidemment pas un haut-parleur pour chaque point de la sphère qui entoure l'auditeur. Il faut donc interpoler ou extrapoler les valeurs des filtres HRTF, ce qui peut nuire à la qualité du rendu sonore 3D. De plus, les mesures sont entachées d'erreurs, en raison de la complexité du dispositif mis en œuvre.

Par ailleurs, on effectue généralement les mesures dans des environnements dont l'acoustique est contrôlée, souvent en chambre sourde (c'est-à-dire avec des murs absorbants qui éliminent les réflexions). Seul le son direct émis par la source est alors mesuré: l'environnement ne joue pas de rôle. Or notre capacité à localiser les sons est bien plus efficace dans une pièce où les nombreuses réflexions, sur les murs et sur les objets qui s'y trouvent, sont autant d'indices qui permettent à notre cerveau de localiser rapidement et avec précision la source sonore. L'effet de l'environnement est donc à prendre en compte.

... remplacées par des simulations numériques

On peut contourner ces principaux facteurs limitants de la synthèse binaurale à l'aide de la simulation numérique de la propagation des sons. La physique de la propagation des ondes est modélisée par des équations dont les plus connues (et les plus simples) sont celles dites de d'Alembert et de Helmholtz (voir l'encadré ci-dessus).

Or on peut calculer les filtres HRTF en résolvant numériquement ces équations pour des ondes sonores qui se propagent vers une tête humaine, celle-ci étant aussi représentée par un modèle numérique. On utilise ensuite ces HRTF, déterminées par des « mesures numériques », en lieu et place des HRTF déterminées par des « mesures analogiques » de laboratoire. On lève ainsi deux des verrous précédemment

Équations de d'Alembert et de Helmholtz

L'équation qui régit l'évolution de la pression acoustique P (une fonction de la position (x, y, z) et du temps t) dans un milieu homogène (l'air ambiant) et se propageant à vitesse c s'écrit :

$$\partial^2 P / \partial t^2 - c^2 \Delta P = 0,$$

où $\partial^2 P / \partial t^2$ est la dérivée seconde de P par rapport au temps t , en supposant les autres variables (x, y, z) constantes (c'est une « dérivée partielle »), et ΔP désigne l'expression $\partial^2 P / \partial x^2 + \partial^2 P / \partial y^2 + \partial^2 P / \partial z^2$.

Cette équation des ondes, dite de d'Alembert, est linéaire, c'est-à-dire que la somme de deux solutions est encore une solution. En cherchant des solutions particulières de la forme :

$$P(x, y, z, t) = u(x, y, z) e^{i 2\pi f t},$$

expression qui correspond à une onde stationnaire oscillant à la fréquence f , on

trouve que la fonction u doit obéir à l'équation dite de Helmholtz :

$$\Delta u + k^2 u = 0,$$

où $k = 2\pi f / c$ est le « nombre d'onde ». Cette équation aux dérivées partielles est elle aussi linéaire. Cette propriété permet, en utilisant des techniques du calcul intégral datant de la fin du XIX^e siècle, de transformer l'équation de Helmholtz en une équation comportant des intégrales où n'interviennent que les valeurs prises par la fonction u sur la frontière du domaine, qui est une surface. Cette formulation sous la forme d'une équation intégrale présente plusieurs avantages pour la résolution numérique, notamment celui de réduire considérablement la partie de l'espace qu'il faut discrétiser.

POUR MESURER EXPÉRIMENTALEMENT les filtres HRTF qui caractérisent l'influence de la forme de la tête sur les sons perçus, on utilise une tête artificielle, où un petit microphone est inséré dans chaque oreille.



© Neumann

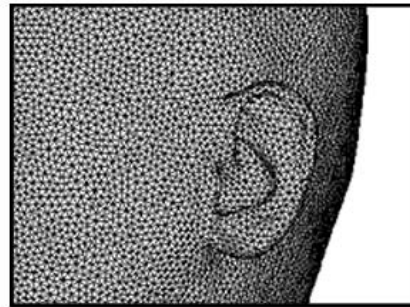
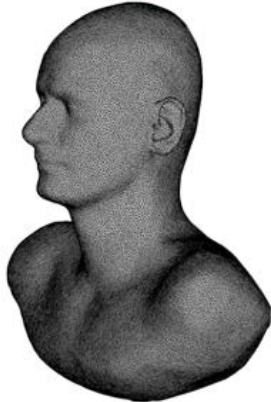
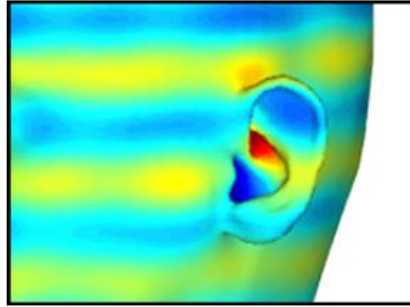
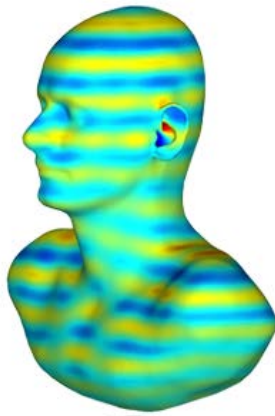
évoqués pour la synthèse binaurale, à savoir le caractère discret, non continu, des mesures de laboratoire et les erreurs qui les affectent.

Cette approche est très attrayante, car elle ne nécessite pas de matériel complexe de mesure ni d'ordinateur particulièrement puissant. De plus, on peut personnaliser le calcul en utilisant un modèle numérique de la tête d'un auditeur particulier, et obtenir des résultats suffisamment fins pour éviter d'avoir à interpoler les valeurs des HRTF.

Le troisième verrou, lié à la prise en compte de la réverbération (les réflexions des ondes sonores), peut aussi être levé en résolvant cette fois un modèle de propagation d'ondes dans une salle. En fonction du modèle choisi et des éventuelles simplifications appliquées à la physique du problème, on peut même envisager que ce calcul soit effectué en temps réel.

Résoudre l'équation des ondes

En pratique, la précision des HRTF nécessite une résolution précise des équations de propagation, tandis que le calcul de la réverbération peut être plus grossier. Cela s'explique notamment par la taille respective des détails géométriques à modéliser: la physique liée aux pavillons des oreilles est bien plus subtile que celle liée aux murs plans d'une pièce.

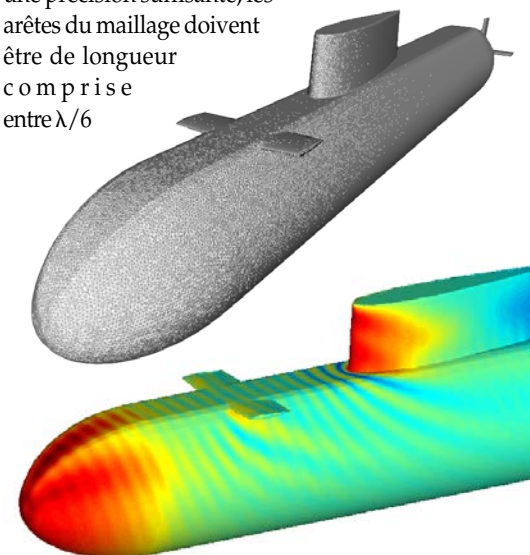


LA PRESSION ACOUSTIQUE à la surface d'un auditeur virtuel, due à une onde sonore de fréquence 8 kilohertz se propageant de haut en bas (les couleurs foncées représentent les pressions maximales en valeur absolue). On voit que le son est amplifié au niveau du tympan. C'est le résultat d'une résolution numérique des équations des ondes effectuée à l'aide du logiciel MyBEM, développé à l'École polytechnique par les auteurs. Le calcul exige une discrétisation fine, comme le montre le maillage (réalisation du projet SYMARE) du buste et de la tête.

définie par un maillage suffisamment fin et géométriquement adapté. Les nœuds du maillage sont les points où les valeurs (approchées) de la fonction-solution seront déterminées. On recherche ensuite ces valeurs en supposant que la fonction-solution approchée est la somme de fonctions simples et connues, choisies dans un ensemble approprié. Cette méthode, où l'on peut justifier mathématiquement l'existence et l'unicité de la solution approchée, est aujourd'hui un outil fondamental de calcul numérique dans le monde industriel.

Prenons l'exemple d'un problème d'acoustique en domaine fréquentiel, c'est-à-dire la propagation d'une onde sonore sinusoïdale, de fréquence bien définie (équation de Helmholtz, voir l'encadré page 45). La méthode des éléments finis consistera ici à définir un maillage du volume où se propage l'onde sonore. Ce maillage servira de base au calcul d'une solution approchée représentant la pression acoustique.

À cause de la nature oscillante de la solution recherchée, pour atteindre une précision suffisante, les arêtes du maillage doivent être de longueur comprise entre $\lambda/6$



© M. Aussal et F. Alouges

Toutefois, afin que la résolution numérique soit précise et fiable, il faut connaître les limites des méthodes et algorithmes utilisés. Ce qui nécessite une compréhension profonde des modèles mathématiques associés (la propagation des ondes sonores), ainsi que des phénomènes sous-jacents (la diffraction). Il est généralement impossible de trouver des solutions « analytiques » (des expressions mathématiques compactes) à l'équation de propagation des ondes. D'où la nécessité de la résoudre numériquement, par une méthode adaptée. Celle-ci, mise en œuvre dans un logiciel et exécutée par un ordinateur, fournira une approximation de la solution théorique exacte. Cette démarche est caractéristique des mathématiques appliquées, dans un grand nombre de domaines scientifiques et techniques.

La simulation numérique de la propagation d'ondes est un sujet déjà bien documenté puisqu'il a de nombreuses applications. Acoustique architecturale, conception de véhicules militaires furtifs, influence de champs d'éoliennes sur les radars, étude de la pollution sonore, etc. : la propagation d'ondes sonores ou électromagnétiques intervient dans d'innombrables questions, et la simulation numérique fournit souvent des informations utiles tout en évitant le

recours à des expériences coûteuses ou difficilement réalisables.

Quelles sont les méthodes utilisées pour résoudre numériquement l'équation qui décrit la propagation des ondes ? Cette équation est une « équation aux dérivées partielles », c'est-à-dire une équation reliant la fonction à déterminer, qui dépend de plusieurs variables, à ses dérivées.

Construire un maillage adapté de l'espace

Depuis les années 1950, la méthode dite des éléments finis fournit un cadre mathématiquement rigoureux pour le calcul approché des solutions de ce type d'équations. En pratique, l'idée générale est d'abord de découper l'espace en petits morceaux : on discrétise le domaine où l'équation est

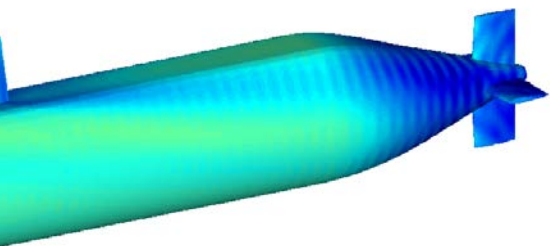
LES MÉTHODES NUMÉRIQUES développées pour la synthèse de son 3D s'appliquent à de nombreux autres domaines, par exemple l'étude de la détectabilité d'un sous-marin recherché à l'aide d'un sonar. Le résultat d'un calcul de la pression acoustique sur la surface du sous-marin, pour une onde sonar venant de l'avant, est représenté ici, avec le maillage [réalisé par ESI Group] qui a été utilisé.

et $\lambda/12$, où λ est la longueur d'onde considérée. Il s'ensuit que pour des fréquences élevées (courtes longueurs d'onde), le nombre de sommets du maillage se révèle souvent prohibitif. Ainsi, le maillage d'une pièce mesurant $3 \times 4 \times 2,5$ mètres avec des mailles cubiques de 0,5 centimètre de côté comporterait environ 240 millions de sommets, ce qui donnerait lieu à un système d'équations à 240 millions d'inconnues !

Il est possible de réduire l'ampleur de la tâche. En effet, des manipulations mathématiques permettent de donner à l'équation des ondes une formulation en termes d'intégrales où la fonction inconnue n'intervient plus que par les valeurs qu'elle prend sur la frontière du domaine de propagation (voir l'encadré page 45). Ainsi, pour une onde sonore se propageant dans un milieu ouvert où se trouve l'auditeur, seules interviennent dans l'équation intégrale les valeurs prises par la fonction inconnue sur la surface de l'auditeur.

Un calcul ramené à une surface finie

La résolution numérique de cette équation intégrale surfacique nécessite une écriture mathématique et une algorithmique sous-jacente plus complexes que les méthodes volumiques. Mais l'avantage est que seule la surface de l'objet soumis aux ondes doit être discrétisée, et non tout le volume de propagation. Dans le cas de la pièce de quelques mètres envisagée plus haut où est placé l'auditeur, on réduit ainsi le nombre d'inconnues de 240 millions à seulement quelques millions. Et de façon plus générale, comme la formulation intégrale ramène un problème posé dans tout l'espace (infini) à un problème posé sur une surface finie, sa résolution numérique est



bien plus précise que celle de l'équation aux dérivées partielles.

Le développement de méthodes performantes pour résoudre numériquement ces équations intégrales a démarré un peu avant les années 2000 et est un champ de recherche encore très actif. Citons les noms de trois méthodes rapides adaptées aux problèmes de propagation d'ondes et aujourd'hui utilisées dans la recherche et l'industrie : les méthodes multipolaires rapides, inventées à l'université Yale par Leslie Greengard et Vladimir Rokhlin en 1988, la méthode des matrices hiérarchiques, inventée en 1999 par Wolfgang Hackbusch, de l'institut Max-Planck à Leipzig, et la *sparse cardinal sine decomposition*, que nous avons conçue en 2013.

Toutes ces méthodes permettent de réduire très sensiblement le temps de calcul et la mémoire nécessaires à la résolution de formulations intégrales pour la propagation des ondes, ce qui rend aujourd'hui le calcul numérique des HRTF accessible sur un ordinateur usuel. Typiquement, il faut compter une dizaine d'heures pour calculer tous les filtres HRTF avec une précision suffisante pour les applications.

Le calcul numérique des HRTF ouvre la voie à une meilleure compréhension du lien entre ce que perçoit un auditeur et ses détails morphologiques, en particulier les formes de ses oreilles et de sa tête. Il est facile, en utilisant le modèle numérique, de déformer les oreilles ou la tête d'un sujet virtuel, puis de construire une base de données exhaustive des formes possibles. On pourra alors proposer une famille de HRTF adaptées à chacun. Plus généralement, ces approches numériques aideront à améliorer la spatialisation sonore des casques de réalité virtuelle, mais aussi, pourquoi pas, les prothèses auditives ou les dispositifs de guidage de personnes malvoyantes.

Enfin, de l'autre côté du spectre, la généralité de l'outil mathématique développé le rend applicable à de nombreux autres problèmes de propagation d'ondes. Ainsi, le même logiciel et les mêmes algorithmes de calcul de HRTF permettent de simuler efficacement la propagation d'ondes sonores dans un théâtre, des ondes émises par un sonar en milieu aquatique (voir la figure ci-contre), des ondes radar (électromagnétiques) auxquelles cherche à échapper un avion furtif, etc. Un vaste champ d'applications ! ■

MyBino, un logiciel gratuit pour son 3D

L'équipe X-Audio du Centre de mathématiques appliquées de l'École polytechnique a développé un logiciel de rendu binaural gratuit, à destination des professionnels du son et du grand public. Issu d'une collaboration avec les ingénieurs du son du Conservatoire national de musique et danse de Paris (CNSMDP), cet outil permet de mixer et d'écouter des enregistrements sonores contenant jusqu'à 48 canaux avec un simple casque audio. Il a été conçu pour maximiser la sensation d'externalisation des sons, tout en réduisant le plus possible les artefacts de traitement audibles (www.cmap.polytechnique.fr/xaudio/mybino).

■ BIBLIOGRAPHIE

F. Alouges et M. Aussal, *The sparse cardinal sine decomposition and its application for fast numerical convolution*, *Numerical Algorithms*, vol. 70(2), pp. 427-448, 2015.

M. Aussal, *Méthodes numériques pour la spatialisation sonore, de la simulation à la synthèse binaurale*, thèse de doctorat, École polytechnique, 2014.

J.-C. Nédélec, *Acoustic and Electromagnetic Equations: Integral Representations for Harmonic Problems*, Springer, 2001.

D. R. Begault et L. J. Trejo, *3-D sound for virtual reality and multimedia*, rapport NASA/TM-2000-209606, 2000.

J. Blauert, *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*, MIT Press, 1997.