

## Avant-propos

L'objectif principal de cet ouvrage est de développer les concepts physiques et les modèles les plus utiles pour comprendre les applications de l'acoustique, classées par Bruce Lindsay dans quatre domaines : les sciences de la terre, les sciences de l'ingénieur, la médecine et les arts. Cet ouvrage est destiné aux étudiants en master de mécanique et d'acoustique, aux élèves des grandes écoles, aux ingénieurs et aux doctorants. Dans la mesure où tous les résultats sont établis, le lecteur devrait trouver le matériel pédagogique nécessaire dans les dix chapitres et les cinq annexes de l'ouvrage.

Le mouvement oscillant d'une membrane dans un fluide, comme l'air, engendre une onde. Lorsque sa fréquence est audible ( $20 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$ ), c'est une onde acoustique. Depuis la formulation de Newton en 1687, il est connu que la propagation du son est régie par l'inertie et la compressibilité de l'air. Dans le domaine usuel des fréquences, le milieu fluide peut être supposé continu. L'étude de son mouvement et de son comportement relève donc de la mécanique et de la thermodynamique des milieux continus. Selon les conditions, le fluide peut être considéré comme parfait, visqueux ou thermovisqueux. Les notions essentielles de physique des fluides, de mécanique et de thermodynamique ainsi que les différents modèles de fluide sont rappelés dans le premier chapitre. La propagation des ondes acoustiques dans un fluide homogène est ensuite étudiée à partir d'un modèle unidimensionnel, qui suffit pour établir l'équation de propagation. Dans le cas général, celle-ci dérive de relations exprimant les lois de conservation de la matière, de la quantité de mouvement et de l'énergie. L'étude se simplifie lorsque le milieu est un fluide parfait dans lequel n'intervient aucun phénomène dissipatif. Avec l'hypothèse de mouvements petits par rapport à un état d'équilibre, il est possible de linéariser les équations de conservation et la loi de comportement du fluide afin d'établir une équation de propagation. Dans ces conditions, seule une onde longitudinale, suite de compressions et de dilatations est susceptible de se propager. L'hypothèse du fluide parfait est une approximation

puisqu'en pratique les ondes acoustiques s'atténuent lors de leur propagation. Dans le chapitre 3, nous examinons les effets de la viscosité, de la conduction thermique et de la relaxation moléculaire, mécanisme d'absorption dominant dans l'air. Dans le chapitre 4, nous développons un aspect plus mathématique lié aux propriétés et aux solutions de l'équation des ondes et de l'équation de Helmholtz (régime harmonique). Nous explicitons les propriétés de linéarité, d'invariance, de causalité, de réciprocity et d'unicité. Le principe de superposition conduit à exprimer le champ acoustique émis par une source étendue à l'aide d'une solution fondamentale appelée fonction de Green. La résolution de l'équation de Helmholtz est facilitée par la formulation intégrale développée par Kirchhoff. Lorsque les dimensions du fluide sont finies (chapitre 5), il faut adjoindre à l'équation de propagation des conditions aux limites. L'examen de la réflexion et de la réfraction d'une onde acoustique plane au passage d'un milieu à un autre conduit à la caractérisation du fluide par une impédance acoustique. Lorsque le fluide est limité par des parois rigides, les solutions sont des ondes guidées dont la propagation est souvent dispersive. Au voisinage de ces parois, des phénomènes dissipatifs importants apparaissent dans les couches limites acoustiques. L'émission d'une onde acoustique dans un fluide a souvent pour origine la vibration d'une structure solide. C'est le cas des instruments de musique à cordes ; la corde sollicitée transmet son mouvement vibratoire au corps de l'instrument qui se met à son tour à vibrer. Dans le domaine industriel, en particulier dans celui des transports, ces phénomènes sont à l'origine de nuisances sonores. La génération par une source ponctuelle, un réseau de sources, un disque plan oscillant, une plaque vibrant en flexion est traitée dans le chapitre 6. Dans l'atmosphère ou dans les océans, des ondes acoustiques de fréquence suffisamment basse sont susceptibles de se propager sur des distances très grandes par rapport à la longueur d'onde. Étant donné l'étendue du domaine d'intérêt, des méthodes approchées de résolution de l'équation des ondes ont été développées. Dans le chapitre 7, la propagation du son est modélisée par des lignes de transport de l'énergie acoustique, appelées rayons, ou par un faisceau acoustique plus ou moins ouvert autour d'une direction de propagation principale. La propagation d'un faisceau diffère de celle d'un rayon en raison des phénomènes de diffraction, qui ne sont pas pris en compte en acoustique géométrique. L'approximation paraxiale de ces effets permet de se ramener à une équation unidirectionnelle, plus simple à résoudre que l'équation de Helmholtz. Dans les chapitres précédents, le fluide était au repos, les sources et les récepteurs étaient immobiles, les obstacles avaient des dimensions très grandes par rapport à la longueur d'onde. En pratique, une onde acoustique peut interagir avec le milieu de propagation et/ou avec des obstacles de forme et de dimensions variées. Dans le chapitre 8, nous étudions l'influence d'un écoulement fluide, l'émission et la réception par un dispositif mobile (effet Doppler), la diffusion par un objet sphérique, l'interaction d'une onde acoustique avec une bulle de gaz immergée dans un liquide ainsi que la propagation dans un milieu contenant un grand nombre de diffuseurs. Par hypothèse, en acoustique linéaire une onde ne modifie pas les propriétés du milieu

de propagation. Ainsi, deux perturbations présentes au même point et au même instant se superposent, sans que l'une ait d'effet sur l'autre, et une onde n'interagit pas avec elle-même. Cette hypothèse est mise en défaut lorsque la vitesse des particules de fluide n'est plus très petite devant la célérité de l'onde. Si les termes quadratiques sont en général négligeables localement, ils sont à l'origine, par effet cumulatif sur plusieurs centaines de longueurs d'onde, de phénomènes non linéaires importants : génération d'harmoniques, interaction paramétrique, apparition d'une onde de choc, étudiés dans le chapitre 9. La force statique exercée par une onde acoustique sur un objet est classiquement attribuée à une grandeur physique, appelée pression de radiation acoustique, qui a d'abord été reliée à un effet non linéaire par Rayleigh, puis à la valeur moyenne de la densité d'énergie acoustique par Langevin. Dans un fluide dissipatif, l'onde acoustique est aussi à l'origine d'un écoulement. Ces effets, abordés dans le dernier chapitre, sont complexes, car ils sont souvent imbriqués.

Les applications de l'acoustique ne se limitent pas aux quatre domaines cités au début de cet avant-propos, car la réponse de la matière, sous toutes ses formes, à une perturbation rapide de son état d'équilibre est souvent du type « acoustique ». Cette affirmation a été récemment confirmée de manière inattendue en cosmologie. L'étude du fond diffus cosmique a révélé une structure inhomogène qui proviendrait d'oscillations dues à des ondes acoustiques se propageant dans le plasma constitué de baryons, d'électrons, de photons et de neutrinos de l'univers primordial. La distance moyenne observée entre les galaxies est l'empreinte des variations de densité, dilatée par l'expansion de l'univers. Les astrophysiciens parlent d'oscillations acoustiques baryoniques : une nouvelle discipline qui s'ajoute à l'acoustique musicale, médicale, sous-marine, architecturale, à l'aéroacoustique et à la vibroacoustique. Cette liste suffit à comprendre qu'il n'est pas possible de rendre compte de toutes les applications de l'acoustique, nous nous contenterons d'en signaler quelques-unes tout au long du texte.

Les auteurs tiennent à remercier François Coulouvrat, directeur de recherche CNRS à l'institut Jean Le Rond d'Alembert, Jean-Louis Thomas, directeur de recherche CNRS à l'institut des Nanosciences de Paris et Arnaud Tourin, professeur à l'institut Langevin Ondes et Images (ESPCI Paris-PSL), pour l'aide qu'ils leur ont apportée au cours de la rédaction de cet ouvrage.