

Avant-propos

Cet ouvrage fait suite à deux ouvrages écrits avec Eugène Dieulesaint sur les *Ondes élastiques dans les solides* ayant comme sous-titre *propagation libre et guidée*, pour le premier, et *génération, interaction acousto-optique, applications*, pour le second.

Le présent ouvrage se compose également de deux volumes. Il s'adresse aux étudiants de master de physique, de mécanique et de géophysique, aux élèves des grandes écoles, aux doctorants, aux ingénieurs, aux chercheurs et enseignants-chercheurs. L'objectif est d'analyser la propagation, les interactions et la génération des ondes élastiques dans une grande variété de milieux solides et de structures en utilisant, autant que possible, un formalisme commun applicable aux ondes de volume et de surface, ainsi qu'aux ondes guidées.

Les ondes élastiques sont des vibrations qui se propagent dans tout milieu : gazeux, liquide, solide. En fait, le qualificatif élastique se rapporte au comportement mécanique du milieu de propagation. Lorsque la fréquence de ces ondes se situe dans le domaine audible (soit environ entre 20 Hz et 20 kHz), l'usage est de les appeler ondes acoustiques (ou sons), avec pour extension infrasons ou ultrasons, suivant que leur fréquence se situe respectivement en deçà ou au-delà de cet intervalle. On englobe souvent sous le terme « acoustique » tout ce qui concerne ces ondes de matière, quelle que soit leur fréquence. Compte tenu des considérations précédentes, cette appellation n'est pas très heureuse, mais elle a l'avantage de définir une discipline, comme la mécanique, l'optique, la thermique, etc., qui est souvent considérée comme étant la plus ancienne des sciences physiques. Quelques rappels historiques et une brève revue des applications des ondes élastiques sont utiles pour expliquer le contenu de l'ouvrage.

Il était connu depuis le mémoire de Poisson, paru en 1829, qu'il pouvait se propager dans le cœur d'un solide élastique isotrope des ondes de matière de polarisation longitudinale ou transverse. À la fin du XIX^e siècle, sur les premiers enregistrements

sismiques, les trains d'ondes P (arrivant en premier) et S (arrivant en second), furent identifiés avec les arrivées des ondes de volume longitudinale (la plus rapide) et transverse. Un troisième écho tardif fût attribué aux ondes de surface découvertes, en 1885 par lord Rayleigh. Au début du xx^e siècle, les ondes sismiques furent mises à profit pour sonder l'intérieur de la Terre et en déterminer sa structure. Il n'est donc pas surprenant que la plupart des ondes élastiques furent découvertes par des géophysiciens et portent leurs noms : ondes de Lamb, Love, Stoneley, Scholte.

Jusqu'en 1915 et les travaux de Paul Langevin et Constantin Chilowsky, les tremblements de terre étaient le seul moyen (aussi peu reproductible que destructeur) d'engendrer ces ondes élastiques. Les expériences menées à l'école supérieure de physique et de chimie de Paris, puis dans la Seine et enfin, à Toulon ont démontré l'efficacité de l'effet piézoélectrique, découvert en 1880 par Pierre et Jacques Curie, pour engendrer des ultrasons dans l'eau et détecter leur écho réfléchi par une cible. Pendant des décennies, le quartz fut le seul cristal piézoélectrique utilisé. En raison de ses propriétés mécaniques et de sa stabilité en température exceptionnelles, ses applications s'étendirent au domaine des télécommunications naissantes pour stabiliser et filtrer la fréquence des émetteurs et des récepteurs de radiodiffusion, en particulier après l'élaboration, en 1925, par K.S. Van Dyke d'un côté, D.W. Dye de l'autre, du circuit équivalent d'un résonateur piézoélectrique.

À la suite d'intenses recherches effectuées pendant la Seconde Guerre mondiale, des matériaux piézoélectriques nouveaux sont apparus, en particulier des céramiques à base de titanate et zirconate de plomb, appelées PZT et rendues piézoélectriques par application d'un champ électrique. Ces matériaux, à coefficient de couplage électromécanique nettement supérieur à celui du quartz, ont considérablement simplifié la génération et la détection des ondes élastiques d'une fréquence inférieure à quelques dizaines de MHz. Comme elles se prêtent à la réalisation de transducteurs sensibles, de grandes dimensions et de formes variées, ces céramiques constituent l'élément actif des émetteurs et récepteurs des dispositifs du genre sonar et des instruments d'échographie médicale et métallurgique. L'idée, mise en œuvre en 1965 par R.M. White et F.W. Voltmer, d'engendrer et de détecter des ondes de surface par deux électrodes en forme de peignes, déposées sur un matériau piézoélectrique a été à l'origine d'un développement spectaculaire des applications des ondes de Rayleigh. Ces filtres à ondes élastiques de surface, très compacts, qui se prêtent à une fabrication par « fournées », selon les technologies de microélectronique et fonctionnent dans une plage étendue de fréquences (50 MHz à 5 GHz) ont envahi les domaines de l'électronique « grand public », tels que la télévision et la téléphonie mobile. L'accroissement continu de leurs performances a exigé l'élaboration de nouveaux cristaux piézoélectriques de grandes dimensions, ainsi qu'une analyse de plus en plus fine de la propagation, des interactions et de la génération des ondes de surface.

Depuis les années 1990, nous assistons à un développement important des ondes élastiques dans des domaines variés, comme l'imagerie et la thérapie médicales, l'évaluation non destructive des matériaux, les capteurs de grandeurs physiques ou biologiques, les systèmes de détection et de localisation en acoustique sous-marine, la recherche et l'exploration des gisements pétrolifères. Ces avancées ont différentes origines, souvent mêlées : l'élaboration de matériaux composites et de couches minces piézoélectriques, la mise au point d'instruments performants (microscope acoustique, transducteur à éléments multiples), l'invention de méthodes innovantes (retournement temporel), ainsi que l'apport de l'informatique, aussi bien pour les simulations que dans la conduite des processus. Il n'est pas possible de décrire ici toutes ces applications, dont l'évolution est très rapide.

Notre objectif est de fournir au lecteur les bases théoriques nécessaires pour les comprendre, les approfondir et en développer d'autres. Afin de ne pas rester dans l'abstraction, les phénomènes sont illustrés par de nombreuses figures correspondant à des structures et des matériaux usuels. Par ailleurs, des ordres de grandeur des paramètres physiques sont régulièrement présentés dans le texte.

Le premier volume est divisé en quatre chapitres suivis d'annexes. Le [chapitre 1](#) a pour objet la propagation des ondes élastiques dans un solide illimité. En l'absence de frontière, le seul problème est d'établir les équations de propagation d'un ébranlement mécanique et de les résoudre, mais il faut pour cela connaître les lois de comportement du solide. Celui-ci peut-être isotrope, anisotrope, piézoélectrique, purement élastique ou viscoélastique. Le [chapitre 2](#) est consacré aux phénomènes de réflexion et de transmission entre deux milieux semi-infinis séparés par une interface plane. Il faut alors adjoindre aux équations de propagation dans chacun des milieux des conditions aux limites qui assurent le raccordement des grandeurs physiques sur la frontière. Plusieurs exemples sont traités : interfaces solide-vide, solide-fluide parfait, solide isotrope-cristal. Dans chaque configuration, l'analyse met en évidence des modes propres qui existent en l'absence de toute onde incidente ; ces ondes de surface et d'interface font l'objet du [chapitre 3](#). Un cas très important est celui du solide semi-infini, à la surface duquel se propage toujours, quel que soit le matériau, une onde de Rayleigh pure ou généralisée. D'autres ondes apparaissent à l'interface entre un solide et un fluide (ondes de Scholte) et les conditions d'existence sont très restrictives à l'interface entre deux solides (ondes de Stoneley). Lorsque le solide est limité par plusieurs plans parallèles, les réflexions successives des ondes élastiques de volume donnent naissance à des ondes guidées, dont les propriétés sont analysées dans le [chapitre 4](#). Les plus simples sont les ondes transverses horizontales, découvertes par Love, qui se propagent en partie dans une couche, en partie dans son substrat. Étant donné leur importance pratique, les ondes de Lamb, à deux composantes, qui progressent dans une plaque sont traitées en détail aussi bien dans le cas d'un solide

isotrope qu'anisotrope. La propagation de ces modes de plaque est dispersive, comme celle des ondes guidées par un cylindre, traitée à la fin de ce chapitre.

Les auteurs tiennent à remercier Claire Prada, directrice de recherche au CNRS, à l'institut Langevin Ondes et Images, pour l'aide qu'elle leur a apportée au cours de la rédaction de ce premier volume.