

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

ACOUSTIQUE

Acoustique générale

Équations différentielles et intégrales,
solutions en milieux fluides et solides,
applications

Catherine POTEL

Michel BRUNEAU



La collection TECHNOSUP dirigée par Claude Chêze est une sélection d'ouvrages dans toutes les disciplines, pour les filières technologiques des enseignements supérieurs.

Niveau A **Approche** (éléments, résumés ou travaux dirigés) *IUT - BTS - 1^{er} cycle*

Niveau B **Bases** (cours avec exercices et problèmes résolus) *IUP - Licence*

Niveau C **Compléments** (approfondissement, spécialisation) *Écoles d'ingénieurs, Master*

L'ouvrage : niveaux B (Licence) et C (Master, Ecoles d'ingénieurs)

L'ouvrage fournit avec minutie les bases de l'acoustique classique, tout en présentant régulièrement un ensemble d'applications relevant de la pratique de l'acoustique. Il est construit pour être compréhensible sans avoir recours à d'autres documents. Son contenu est lié à l'acoustique en milieux fluides simples, puis en milieux solides homogènes. Les hypothèses sous-jacentes sont régulièrement précisées et les méthodes exposées conservent le plus souvent un caractère analytique.

Pour couvrir le domaine de l'acoustique fondamentale, l'ouvrage traite successivement : les ondes acoustiques, l'environnement sonore et la perception des sons, les équations générales, les solutions fondamentales dans les systèmes de coordonnées courbes, les problèmes aux limites et leur formulation intégrale, la propagation en milieu solide homogène (avec application au contrôle non destructif par ultrasons). Il s'achève sur des annexes qui apportent des éclairages sur les éléments mathématiques utiles et sur certaines notions délicates (impédance, vitesses de phase et de groupe...).

Les auteurs :

Catherine Potel est Professeur des universités à l'Université du Maine, où elle est responsable du Master professionnel Acoustique des transports. Elle mène des travaux de recherche dans le domaine de l'évaluation et du contrôle non destructifs par ultrasons.

Michel Bruneau est Professeur émérite à l'Université du Maine, où il a dirigé le 3^e cycle d'acoustique et dont il a créé le Laboratoire d'acoustique associé au CNRS. Il mène des recherches dans le domaine des fluides dissipatifs confinés. Il a assuré diverses responsabilités scientifiques nationales.

Illustration de couverture : Dessin de Léonard de Vinci.



ISBN 2-7298-2805-2

TABLE DES MATIERES

Préface, Avant-Propos	3
Chapitre I. L'ACOUSTIQUE ET SES APPLICATIONS	9
1. Les grands domaines de l'acoustique.....	9
2. Eléments d'histoire de l'acoustique.....	11
2.1. Quelques millénaires avant Jésus-Christ	11
2.2. Quelques siècles avant Jésus-Christ	12
2.3. Un millénaire et demi plus tard	14
3. Notion d'onde mécanique	17
3.1. Introduction	17
3.2. Ondes de compression et ondes de cisaillement	17
3.3. Fréquence d'une onde	19
3.4. Caractéristiques physiques d'une onde	19
3.5. Transmission acoustique	21
4. Mouvements acoustiques. Domaine audible	22
4.1. Les ordres de grandeur	22
4.2. Les variables fondamentales	24
4.3. Les effets dissipatifs	25
4.4. Les niveaux sonores	26
5. Propagation en milieu solide isotrope et anisotrope.....	28
5.1. Génération d'ondes élastiques dans un solide	29
5.2. Comportement linéaire d'un solide élastique	29
5.3. Différents types d'ondes : exemple des ondes sismiques	31
5.4. Différents types d'ondes : retour au cas général	32
Chapitre II. ELEMENTS DE PHYSIOLOGIE DE L'OREILLE, DE PERCEPTION ; GENE ET ENVIRONNEMENT SONORE	35
1. Niveaux sonores et perception.....	35
1.1. Les niveaux sonores	35
1.2. Les courbes isosoniques	37
1.3. Les diagrammes de pondération	38
2. Physiologie de l'oreille.....	39
2.1. L'oreille externe.....	39
2.2. L'oreille moyenne.....	40
2.3. L'oreille interne	41
3. Notions sur la gêne due au bruit	43
3.1. Niveau sonore équivalent	43
3.2. Les cartes de bruit et les points noirs du bruit routier et ferroviaire	44
3.4. Plans de gêne sonore et d'exposition au bruit	45
4. Perception et acoustique des salles.....	47
4.1. Les sons	47
4.2. La perception.....	47
Chapitre III. FORMULATION ANALYTIQUE DE PROBLEMES DE L'ACOUSTIQUE EN MILIEU FLUIDE : LES LOIS FONDAMENTALES	53
1. Paramètres et variables thermomécaniques	54
1.1. Les paramètres thermodynamiques d'un fluide	54
1.2. Les variables thermomécaniques d'un fluide	54
1.3. Etat thermodynamique d'un fluide	56
2. Les différentes sources acoustiques	59
2.1. Les sources de volume	59
2.2. Les sources de surface	60
3. Les équations fondamentales de l'acoustique en milieu fluide	60
3.1. Notion de dérivée particulière	61
3.2. L'équation d'Euler (traduction de l'inertie)	63
3.3. L'équation de conservation de la masse : traduction de l'élasticité (compressibilité en fluide)	66
3.4. Loi de comportement d'un fluide : le coefficient de compressibilité	70
3.5. Synthèse des trois lois fondamentales de l'acoustique.....	72

3.6.	L'équation de propagation	73
4.	Hypothèses conduisant à une simplification des équations fondamentales de l'acoustique en milieu fluide (linéarité, homogénéité du fluide, ...)	74
4.1.	Définitions	74
4.2.	Linéarisation des équations fondamentales de l'acoustique.....	76
4.3.	Equations fondamentales de l'acoustique dans l'hypothèse de fluide homogène, au repos et indépendant du temps	77
4.4.	Linéarisation des équations fondamentales de l'acoustique dans l'hypothèse de fluide homogène, au repos et indépendant du temps	77
4.5.	Le potentiel des vitesses (cas des équations fondamentales de l'acoustique linéaire dans l'hypothèse de fluide homogène, au repos et indépendant du temps, hors des sources)	81
5.	Les problèmes aux limites de l'acoustique	83
5.1.	Divers types de conditions aux frontières	84
5.2.	Linéarisation des conditions aux frontières	85
5.3.	Conditions aux frontières usuelles en acoustique linéaire, en hypothèse de fluide homogène au repos, ne dépendant pas du temps	86
5.4.	Problème acoustique bien posé	91
6.	Densité et flux d'énergie, loi de conservation de l'énergie	92
6.1.	Densité totale d'énergie acoustique instantanée et flux d'énergie instantané	92
6.2.	Equation de conservation de l'énergie acoustique	94
6.3.	Vecteur intensité acoustique.....	96
6.4.	Puissance moyenne d'une source.....	99
 Chapitre IV. : SOLUTIONS FONDAMENTALES EN COORDONNEES CARTESIENNES -		
Problèmes linéaires de l'acoustique en fluide homogène, indépendant du temps et au repos		101
1.	Solutions de problèmes à une dimension	103
1.1.	Les équations de l'acoustique en problème unidimensionnel (hors des sources)	103
1.2.	La solution générale de l'équation de propagation	104
1.3.	Les ondes planes progressives et les ondes planes stationnaires	106
1.4.	Définition et propriétés générales d'une onde plane	110
1.5.	Les ondes planes monochromatiques	112
1.6.	Interaction d'une onde plane monochromatique avec une paroi d'admittance non nulle, en incidence normale	115
1.7.	Champ acoustique dans un tube de longueur finie (cas unidimensionnel).....	119
2.	Solutions de problèmes à trois dimensions	122
2.1.	Recherche des solutions à variables séparées.....	123
2.2.	Réflexion et transmission à l'interface entre deux milieux fluides différents.....	128
2.3.	Guide bidimensionnel	141
2.4.	Propagation dans les pavillons	154
 Chapitre V. SOLUTIONS FONDAMENTALES EN COORDONNEES CYLINDRIQUES -		
Problèmes linéaires de l'acoustique en fluide homogène, indépendant du temps et au repos		161
1.	Solutions à variables séparées	161
1.1.	Equation des ondes en coordonnées cylindriques (hors des sources).....	161
1.2.	Solutions à variables séparées de l'équation des ondes	162
2.	Ondes progressives à caractère cylindrique : rayonnement d'un cylindre infiniment long en régime harmonique	168
2.1.	Rayonnement d'un cylindre infiniment long en régime harmonique.....	168
2.2.	Vibreux d'ordre 1 : cylindre oscillant, corde vibrante	171
3.	Diffraction d'une onde plane sur un cylindre dont la surface est caractérisée par son impédance acoustique	172
3.1.	Ecriture du problème bien posé dans le milieu fluide	173
3.2.	Solution du problème posé.....	174
4.	Champ acoustique dans un conduit cylindrique infini	176
4.1.	Ecriture du problème bien posé.....	176
4.2.	Forme de solution du problème posé.....	177
4.3.	Solution du problème	177
4.4.	Modes propagatifs et évanescents	179
4.5.	Cas d'une onde stationnaire en ψ	181
4.6.	Vitesse de phase et vitesse de groupe.....	182
4.7.	Flux d'énergie portés par les modes dans la direction du guide	183

Chapitre VI. SOLUTIONS FONDAMENTALES EN COORDONNEES SPHERIQUES -	
Problèmes linéaires de l'acoustique en fluide homogène, indépendant du temps et au repos	185
1. Solutions à variables séparées	186
1.1. Equation des ondes en coordonnées sphériques (hors des sources)	186
1.2. Solutions à variables séparées de l'équation des ondes	187
2. Ondes progressives à caractère sphérique : rayonnement d'une sphère vibrant avec une symétrie axiale en espace infini	196
2.1. Sphère vibrant avec une symétrie axiale	196
2.2. Rayonnement de la sphère pulsante	197
2.3. Rayonnement de la sphère oscillante	201
2.4. Retour au cas général de la sphère vibrant avec une symétrie axiale	205
3. Diffraction d'une onde plane par une sphère dont la surface est caractérisée par son impédance acoustique	211
3.1. Le problème dans le milieu fluide	211
3.2. Solution du problème posé	212
4. Champs monopolaire et dipolaire - fonction de Green	213
4.1. Champ monopolaire	214
4.2. Champ dipolaire	217
Chapitre VII. FORMULATION INTEGRALE DES PROBLEMES AUX LIMITES DE L'ACOUSTIQUE EN MILIEUX FLUIDES	
221	
1. La fonction de Green	222
1.1. Introduction	222
1.2. Problèmes élémentaires de l'acoustique, solutions	224
1.3. Fonction de Green en espace semi infini : méthode de la source image	226
1.4. Fonction de Green en espace clos : développement modal	229
2. La formulation intégrale	234
2.1. Introduction	234
2.2. L'équation intégrale dans le domaine fréquentiel	235
2.3. Equation intégrale dans le domaine temporel	239
3. Rayonnement de sources de frontières en espace semi infini (intégrale de Rayleigh) - application au rayonnement des haut-parleurs, des transducteurs,	240
3.1. Problème posé	240
3.2. Choix de la fonction de Green	241
3.3. Champ acoustique rayonné	242
3.4. Cas du disque ayant une vitesse vibratoire indépendante du point	243
4. Couplage fluide/structure : exemple de la transparence acoustique de paroi	249
4.1. Introduction	249
4.2. Le champ acoustique amont ($z < 0$)	251
4.3. Le champ acoustique aval ($z > 0$)	253
4.4. Le champ vibratoire de la plaque ($z = 0$)	255
4.5. La transparence	259
Chapitre VIII. ONDES ELASTIQUES DANS LES SOLIDES ISOTROPES - APPLICATION AU CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR ULTRASONS	
265	
1. Ondes de volume en élasticité isotrope	265
1.1. Tenseur des contraintes et des déformations	265
1.2. Comportement linéaire d'un solide élastique	276
1.3. Equation de propagation des ondes élastiques	280
1.4. Découplage de l'équation de propagation	284
2. Interaction d'une onde plane oblique monochromatique avec une interface plane	292
2.1. Nature des ondes réfléchies et transmises	293
2.2. Equations de continuité	295
2.3. Conservation de la fréquence et de la projection des vecteurs d'onde sur l'interface	295
2.4. Angles critiques - ondes évanescentes	297
2.5. Coefficients de réflexion et de transmission	300
3. Application au Contrôle Non Destructif (CND) par ultrasons	302
3.1. Les transducteurs ultrasonores	302
3.2. L'échographie ultrasonore	305
3.3. Mesure de vitesses de propagation	308
3.4. Utilisation des ondes de Lamb en termes de CND	311

Annexe A1. A PROPOS DU DOMAINE DE FOURIER	314
1. Champ monochromatique et transformée de Fourier d'un champ quelconque.....	314
2. Etablissement par transformée de Fourier de l'équation de Helmholtz dans le cas d'un signal quelconque	315
Annexe A2. COMPLEMENTS SUR LA NOTION D'IMPEDANCE DE PAROI	318
1. Conditions aux frontières sur une paroi à réaction locale (champ quelconque).....	318
2. Interprétation physique de l'impédance complexe de paroi.....	320
2.1. Paroi purement résistive	320
2.2. Paroi purement réactive.....	322
2.3. Analogie mécanique.....	323
2.4. Cas général - bilan énergétique	323
Annexe A3. VITESSES DE PHASE ET DE GROUPE	325
1. Notion de dispersion.....	325
2. Définitions générales des vitesses de phase et de groupe pour un milieu et/ou des ondes dispersifs	326
2.1. Forme générale de la pression acoustique et de l'équation de dispersion.....	326
2.2. Vitesse de phase	326
2.3. Vitesse de groupe	327
3. Cas particulier d'un milieu infini non dispersif.....	331
3.1. Vitesse de phase	331
3.2. Vitesse de groupe	332
4. Ondes dispersives dans le cas particulier d'un milieu limité (guide) en fluide non dispersif.....	333
4.1. Vitesse de phase	333
4.2. Vitesse de groupe	334
5. Vitesse de groupe d'un mode guidé dans un milieu dispersif quelconque.....	335
5.1. Vitesse de la modulation	335
5.2. Vitesse de groupe	336
6. Influence de la dispersion sur la propagation d'un signal complexe (cas 1D)	337
6.1. Hypothèses	337
6.2. Décomposition de la source en somme de Fourier.....	338
6.3. Etalement du signal	339
Annexe A4. FONCTIONS DE BESSEL CYLINDRIQUES	340
1. Solution de l'équation de Bessel lorsque ν est non entier.....	340
2. Solution de l'équation de Bessel lorsque ν est entier	340
3. Solution de l'équation de Bessel lorsque ν est quelconque	341
4. Zéros des dérivées des fonctions de Bessel de première espèce.....	342
5. Equations et fonctions de Bessel modifiées	343
Annexe A5. FONCTIONS DE BESSEL SPHERIQUES	344
BIBLIOGRAPHIE	347
INDEX ALPHABETIQUE	348