

VINCENT MARTIN

ÉLÉMENTS D'ACOUSTIQUE GÉNÉRALE

DE QUELQUES LIEUX COMMUNS
DE L'ACOUSTIQUE À UNE PREMIÈRE
MAÎTRISE DES CHAMPS SONORES

PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

Table des matières

Remerciements	vi
1 Introduction	1
1.1 Bref point de vue sur la physique	2
1.2 Situation de l'acoustique.....	2
1.3 Points de départ d'un ouvrage d'acoustique générale	4
1.4 Organisation de l'ouvrage : des lieux communs de l'acoustique à une première maîtrise des champs sonores	6
1.4.1 Quelques objets sonores courants et phénomènes sous-jacents, ainsi que quelques problèmes industriels et environnementaux	6
1.4.2 Esprit et contenu de l'ouvrage	8
2 Lois linéaires des milieux mécaniques déformables isotropes	11
2.1 Géométrie et cinématique	12
2.1.1 Position et déplacement.....	12
2.1.2 Tenseur des déformations	13
2.2 Efforts et dynamique	15
2.2.1 Traction et contrainte.....	15
2.2.2 Tenseur des contraintes, loi d'équilibre statique et loi de Cauchy	17
2.3 Lois constitutives.....	19
2.3.1 Milieux élastiques linéaires.....	19
2.3.2 Comportements linéaires isotropes	21
2.4 Ondes mécaniques dans un milieu déformable linéaire isotrope et homogène	24
2.4.1 Équations générales.....	24
2.4.2 Ondes de compression et de cisaillement	25
3 Équation des ondes scalaires et équation de Helmholtz : traitement	27
3.1 Équation des ondes sans second membre. groupements.....	28
3.2 Conditions aux limites et conditions initiales.....	30

3.3	Introduction à la théorie modale pour l'équation avec un second membre sinusoïdal.....	32
3.4	Fonction de Green de l'équation des ondes et de l'équation de Helmholtz dans un milieu 1D illimité.....	34
3.5	Procédure pour obtenir la solution spatiotemporelle dans un milieu borné.....	37
3.6	Annexe : rappel sur la résolution d'une équation de vibration ou de propagation linéaire dans le champ complexe	38
3.6.1	Prolongement d'une fonction réelle du temps dans le champ complexe	38
3.6.2	Solution d'une équation différentielle linéaire dont le second membre est sinusoïdal	39
3.6.3	Résolution dans le champ complexe	39
3.6.4	Extension aux équations de propagation	40
4	Corde vibrante : établissement et traitement de l'équation	43
4.1	Première analyse : mouvement dans un plan	44
4.1.1	Comportement du milieu et géométrie	45
4.1.2	Équilibre d'un élément de corde et équation du mouvement	45
4.2	Sensibilisation aux équations non linéaires	47
4.2.1	Configuration.....	48
4.2.2	Comportement	48
4.2.3	Équilibre	49
4.3	Traitement en régime linéaire élémentaire.....	51
4.3.1	Richesse et pauvreté en harmoniques des cordes frappées et pincées.....	51
4.3.2	Relation de phase entre sollicitation et déplacement pour une corde tendue illimitée.....	55
4.4	Exercices	56
5	Colonne acoustique ou guide d'ondes planes : établissement de l'équation des ondes acoustiques	59
5.1	Modélisation physique.....	60
5.1.1	Équilibre des efforts longitudinaux.....	60
5.1.2	Descriptions d'Euler et de Lagrange.....	61
5.1.3	Lois de conservation, de la dynamique et de comportement.....	63
5.2	Propagation acoustique linéaire.....	65
5.2.1	Équation des ondes	65
5.2.2	Quelques ordres de grandeur concernant l'acoustique audible dans l'air	66
5.2.3	Quelques conditions aux limites en régime fréquentiel	67

5.2.4 Considérations énergétiques.....	68
5.3 Sensibilisation à l'acoustique non linéaire.....	69
5.4 Éléments pour situer les équations dans le cadre plus général des fluides compressibles isotropes.....	70
5.5 Exercices.....	72
6 Configurations de base en acoustique	77
6.1 Quatre configurations avec des conditions aux limites de Neumann ou de Dirichlet.....	78
6.1.1 Solutions forcées et résonances.....	78
6.1.2 Passage d'une solution hors résonance à une solution propre	80
6.2 Configuration avec une condition mixte en limite.....	82
6.2.1 Solution forcée.....	82
6.2.2 Impédance ramenée.....	83
6.2.3 Matrice de transfert.....	84
6.3 Impédance ramenée ; généralisation en 3D.....	86
6.3.1 Démarche expérimentale.....	86
6.3.2 Impédance de Rayleigh dans un demi-espace 3D.....	87
6.4 Second membre de l'équation de Helmholtz associé à une source de vitesse en paroi.....	90
6.5 Espace confiné avec une source de domaine.....	92
6.6 Exercices.....	95
7 Contrôle acoustique actif	101
7.1 Description générale.....	102
7.1.1 Ingrédients du contrôle actif.....	102
7.1.2 Démarche semi-intuitive dans un guide infini (domaine 1D non borné).....	103
7.2 Formulation dans un domaine 1D.....	106
7.2.1 Guide infini : contrôle en régime temporel et en régime fréquentiel.....	106
7.2.2 Guide infini : directivité du détecteur.....	109
7.2.3 Guide semi-infini : convolveur de réponse impulsionnelle infinie.....	110
7.3 Contrôle auto-adaptatif.....	111
7.4 Brève extension du contrôle actif dans un domaine 3D.....	114
7.4.1 Préliminaire : fonction de Green 3D.....	114
7.4.2 Espace de causalité pour le contrôle par anticipation.....	115
7.4.3 Optimisation particulière du convolveur.....	117
7.4.4 Contrôle auto-adaptatif.....	118
7.5 Exercices.....	119

8	Introduction à la méthode des rayons	125
8.1	Méthode exacte en 1D.....	126
8.1.1	Configuration géométrique et algorithme d'identification des sources images.....	126
8.1.2	Calcul analytique du champ sonore par cumul des rayons ..	127
8.1.3	Intérêt temporel.....	129
8.1.4	Établissement et décroissance du son en régime harmonique, en présence de parois absorbantes	130
8.2	Extension aux domaines convexes bidimensionnels.....	130
8.2.1	Champ sonore dans un secteur angulaire.....	131
8.2.2	Solution exacte dans un espace quart-infini	134
8.2.3	Cas du domaine convexe fermé	135
8.3	Exercices.....	136
9	Introduction à la méthode des équations intégrales 1D (régime harmonique)	137
9.1	Clef de voûte : l'intégration par partie.....	139
9.2	Usage du noyau analytique en milieu non borné	139
9.2.1	Problème en pression avec des conditions aux limites de Neumann ou mixtes	140
9.2.2	Problème en pression avec des conditions aux limites de Dirichlet.....	141
9.2.3	Problème en pression avec des conditions aux limites de Neumann, voire mixtes, et de Dirichlet	143
9.3	Construction de noyaux en milieu borné.....	144
9.3.1	Noyaux issus de la théorie modale	144
9.3.2	Noyaux issus de la méthode des rayons	145
9.4	Couplages de domaines acoustiques par la méthode intégrale à l'aide de divers noyaux	146
9.5	Exercices.....	149
10	Cavité de Helmholtz	153
10.1	Brève digression sur la voix	154
10.2	Établissement de l'équation de la cavité : version élémentaire ..	155
10.2.1	Couplage entre le domaine et le col.....	156
10.2.2	Considérations énergétiques	158
10.2.3	Haut-parleur et enceinte close (hors considérations électriques)	159
10.2.4	Cavité à deux ports	159
10.3	Traitement de l'équation de la cavité	160

10.3.1 Réponse en vitesse d'une cavité à un port, sollicitée par une pression incidente.....	161
10.3.2 Réponse en vitesse d'une cavité à deux ports : cas de la vitesse imposée sur l'un d'eux.....	162
10.3.3 Amortissement, largeur de bande et coefficient de qualité.....	163
10.3.4 Intensité rayonnée.....	164
10.3.5 Composition d'une pression réfléchie sur un obstacle vibrant, et absorption d'une cavité.....	165
10.4 Exercices.....	167
11 Onde de flexion : établissement	173
11.1 Première analyse en statique.....	174
11.1.1 Version élémentaire.....	174
11.1.2 Origine des termes de la version élémentaire ; extension à la plaque 1D.....	178
11.2 Écriture plus générale dans le cadre de l'élasticité linéaire. Plaque.....	182
11.3 Onde de flexion.....	184
11.3.1 Équilibre dynamique et célérité dans un barreau uniforme.....	184
11.3.2 Équilibre dynamique ; célérité dans une plaque 1D et dans une plaque.....	186
11.4 Exercices.....	187
12 Onde de flexion dans un barreau : traitement	189
12.1 Problème spectral.....	190
12.1.1 Solution de l'équation sans second membre en régime harmonique.....	190
12.1.2 Orthogonalité des fonctions propres.....	191
12.1.3 Fréquences et modes propres selon les conditions aux limites.....	192
12.2 Le diapason.....	195
12.2.1 Déplacement transversal spatiotemporel d'une branche frappée à son extrémité libre.....	195
12.2.2 Détermination des fréquences propres.....	196
12.2.3 Remarques sur le comportement vibratoire et acoustique.....	197
12.3 Fréquences propres d'un barreau non uniforme.....	199
12.4 Exercices.....	203
13 Interactions entre des vibrations mécaniques et acoustiques	207
13.1 Description matricielle en déplacement/pression.....	208
13.1.1 Définition des masse et raideur dynamiques du fluide...	208

13.1.2	Description matricielle en (u_s, p_A)	210
13.1.3	Équation aux fréquences	212
13.2	Pression et impédance de source.....	214
13.2.1	Source à 1 port de rayonnement.....	214
13.2.2	Source à deux ports.....	218
13.2.3	Usage des paramètres de sources	220
13.3	Exercices.....	221
14	Vibrations mécaniques et propagations acoustiques	225
14.1	Problèmes extérieurs	226
14.1.1	Rayonnement d'un piston dans un guide semi-infini.....	226
14.1.2	Couplage d'une colonne fluide infinie avec un oscillateur mécanique	227
14.2	Problèmes intérieurs	233
14.2.1	Rayonnement d'un piston dans un guide ouvert ou fermé	233
14.2.2	Rayonnement d'un piston dans un guide fermé par une impédance.....	235
14.3	Exercices.....	238
15	Formes variationnelles pour la mécanique du point et les vibrations d'ensemble	247
15.1	Particule et mouvement d'ensemble	249
15.1.1	Mouvement libre (sans contrainte).....	249
15.1.2	Mouvement avec contrainte	250
15.2	Principe du travail virtuel, principe de d'Alembert, équations de Lagrange	253
15.2.1	Principes et équations de mouvement.....	253
15.2.2	Détermination de l'énergie potentielle	255
15.2.3	Introduction aux matrices d'éléments finis.....	257
15.3	Action hamiltonienne et variation du lagrangien	258
15.4	Exercices.....	260
16	Formes variationnelles pour quelques problèmes de propagation	263
16.1	Travail virtuel en déplacement.....	265
16.1.1	Principe	265
16.1.2	Application au déplacement acoustique dans un fluide ..	265
16.2	Action hamiltonienne et principe de l'énergie stationnaire	268
16.2.1	Action hamiltonienne	268
16.2.2	Principe de l'énergie stationnaire	269

16.2.3 Application au problème acoustique exprimé en déplacement	272
16.2.4 Application à la poutre uniforme en flexion	273
16.3 Formes variationnelles en termes de forces	275
16.3.1 Formes d'un problème acoustique harmonique en pression	275
16.3.2 Nouvelle distribution des énergies en pression, sans perte d'information. Principe de l'énergie stationnaire complémentaire	277
16.4 Variations des lagrangiens pour un même problème exprimé en déplacement ou en force	279
16.5 Exercices	280
17 Introduction à la méthode des éléments finis	291
17.1 Colonne acoustique	293
17.1.1 Opérateur réel et forme variationnelle	293
17.1.2 Discrétisation par éléments et interpolation nodale	294
17.1.3 Matrices élémentaires et assemblage	296
17.1.4 Opérateur non conservatif	300
17.2 Modélisation numérique simplifiée d'une colonne avec clefs	302
17.2.1 Préalable au sujet de la modélisation physique	302
17.2.2 Forme variationnelle et modélisation numérique	303
17.2.3 Résultats	304
17.3 Barreau non uniforme, en vibration de flexion	306
17.3.1 Formes différentielle, faible et variationnelle	306
17.3.2 Discrétisation et interpolation nodale	307
17.3.3 Matrices élémentaires et assemblage	309
17.3.4 Fréquences propres numériques à partir de l'équation de flexion au premier ordre	311
17.4 Exercices	312
18 Propagations structurales et acoustiques	317
18.1 Approximation unidimensionnelle	319
18.1.1 Onde acoustique plane dans un guide aux parois vibrantes	319
18.1.2 Couplage avec une structure aux réactions locales	320
18.2 Approximations analytiques en 2 et 3D	323
18.2.1 Couplage avec une plaque 1D en flexion	323
18.2.2 Couplage avec une plaque en flexion	325
18.3 Exercices	328

CHAPITRE 1

Introduction

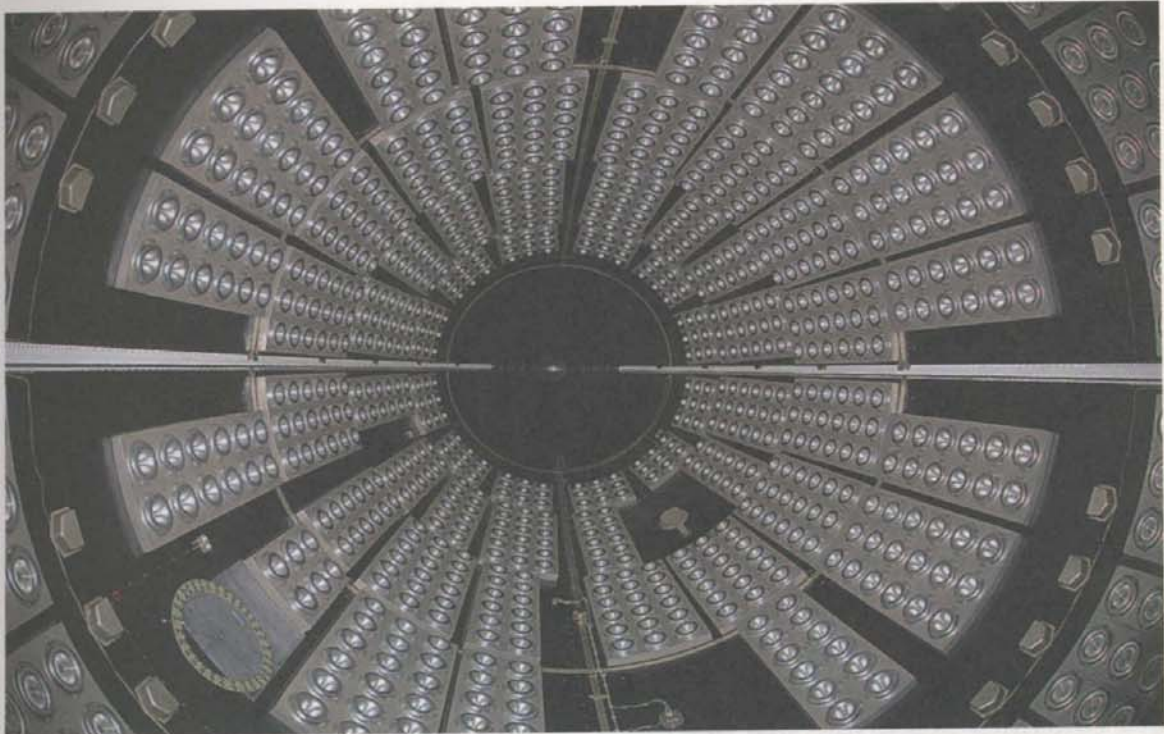


Fig. 1.1 L'acoustique a sa part de responsabilité dans les vibrations des satellites placés dans la coiffe des lanceurs ; des absorbeurs de Helmholtz limitent le bruit sous coiffe dans Ariane V (coiffe vue de dessous).