

Collectif d'auteurs sous la direction de
D. Mercier

Le livre des techniques du son

Notions fondamentales

Tome 1

5^e édition

DUNOD

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



Couverture : Rachid Marai
Illustrations intérieures : Alain et Ursula Bouteville-Sanders
et Rachid Marai

© Dunod, 2002, 2010, 2015
5 rue Laromiguière, 75005 Paris
www.dunod.com

© Éditions Fréquences, Paris, 1987, 1990 pour les deux premières éditions

ISBN 978-2-10-072422-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Préface

Les livres sur la prise de son sont très rares et toujours incomplets. Il n'existe guère dans cette discipline d'ouvrage de référence susceptible de recouvrir tous les domaines mis en jeu par « l'ingénieur » ou l'opérateur de prise de son. Les auteurs de traités d'enregistrement sonore développent dans leurs écrits un des aspects de leur talent, mais aucun n'a réellement tenté de présenter de façon exhaustive l'ensemble des techniques qu'il est conduit à utiliser dans l'exercice de sa profession. Au reste, qui pourrait prétendre maîtriser toutes les facettes d'un métier qui associe de façon aussi complexe des techniques qui relèvent tout autant des sciences de l'ingénieur que de celles de l'art.

Comme le Jupiter de la fable, le fabricant souverain dut créer les preneurs de son... besaciers tous de même manière ; il fit pour leurs techniques la poche de devant et celle de derrière pour leur inspiration et leur créativité.

Car la prise de son cesse d'être une simple technique dès lors que le message sonore est destiné à être reçu et interprété par le cerveau. Elle devient alors une expression qui affecte la sensibilité de l'individu au même titre que toute autre forme d'interprétation créatrice.

Et il faut bien reconnaître que cette composante est certainement la moins bien comprise ou la plus difficile à exprimer dans la prise de son contemporaine.

Confiants dans les évolutions technologiques, les opérateurs, comme les consommateurs ont trop souvent la tentation de se reposer sur les performances infail- libles des machines. Ils pensent, sans se départir de leur sens critique, que certains labels offrent toutes les garanties, que la copie sera conforme à l'original.

Mais la recherche exclusive de cette conformité constitue un contresens fonda- mental du rôle de l'ingénieur du son. Non seulement parce que la restitution

« fidèle » est une utopie mais aussi et surtout parce qu'elle n'a pas sa place dans un processus d'interprétation ou de création.

Les musiciens connaissent bien le problème de la restitution d'une œuvre et de nombreux mélomanes s'accordent à penser que l'asservissement à l'esprit d'un auteur, au style d'une époque ou au respect formel des timbres instrumentaux d'origine, semble un débat quelque peu dépassé (la meilleure interprétation du *Sacre* est-elle celle de Stravinsky ?). Une notion que l'on pourrait traduire par un raccourci un peu schématique en admettant que la restitution (trop) fidèle d'une œuvre sonore peut être aussi limitée sur le plan expressif qu'une photographie aérienne : peut-on la comparer à l'œuvre d'un paysagiste ?

Car l'intégrité du message sonore initial est non seulement illusoire mais inutile et encombrante... L'oreille qui possède de remarquables capacités d'adaptation à son environnement a pour habitude de sélectionner une partie des informations – dans le temps comme dans l'espace – pour les amplifier, les moduler ou les classer afin de mieux les intégrer dans le contexte suggéré par l'œuvre ou imaginé par l'auditeur. Cette plasticité auditive permet au sujet d'interpréter le message et de hiérarchiser les informations qu'il contient. Dès que le cerveau a reconnu leur signification cognitive, culturelle ou affective, il leur attribue des valeurs relatives qui deviennent indépendantes de la nature du message et de la voie sensorielle empruntée. Ainsi, dans la perception d'une œuvre audiovisuelle la conjugaison des signaux reçus par les canaux auditifs et visuels déclenche généralement une « image » intégrée ou conceptuelle qui est perçue par le sujet comme une entité indissoluble.

Ceci est vrai pour des informations cohérentes (le chant du coq, le grincement d'une porte...) ou complémentaires (hôtel du port accompagné du cri de la mouette), mais aussi très souvent, pour des informations non corrélées. Dans ce dernier cas, l'association d'un élément auditif avec un élément visuel ne présentant, a priori, pas de rapport direct, peut compléter, enrichir ou souligner par « contrepoint » la signification initiale de l'image.

Par exemple, dans la dernière séquence des *Visiteurs du soir* la perception simultanée des statues de pierre et des battements de cœur, loin de constituer un détournement réciproque de l'image et du son incite le spectateur à découvrir une signification originale du message proposé. Il pourra, selon sa sensibilité ou son raisonnement, interpréter la séquence en termes subjectifs (émotion du sujet), objectifs (présence ou prolongement de la vie au sein de la pierre) ou fantastique (lecture purement surréaliste de l'œuvre).

La suggestion est un processus actif qui stimule l'imagination du spectateur et touche sa sensibilité. Le message est enrichi par la participation du sujet et son apport inconscient. Il se trouve alors mis en valeur et mémorisé... Ainsi, le détail

suggéré par le son a-t-il souvent plus de poids dans ses conséquences perceptives que la restitution intégrale de tout un contexte auditif.

Par ailleurs, les images sonores ont un retentissement différé dans le temps bien souvent supérieur à celui des images visuelles. La mémoire auditive à long terme peut présenter des performances surprenantes et faire réapparaître avec une brièveté fulgurante des visions ou des évocations très anciennes. C'est par le biais de telles résonances qu'une œuvre atteint sa maturation au cœur des esprits.

Ainsi, si l'auteur assure la maîtrise de son discours par la sélection – *a priori* – d'éléments pertinents dans une continuité narrative, il doit en être de même pour le preneur de son. En tant que maillon d'un processus de création, il a pour mission de réinterpréter le message sonore en anticipant sur toute la séquence de traitement ultérieur et de diffusion du signal. Il doit connaître à tout moment les conditions de restitution et d'écoute du son afin de faire une présélection qui tienne compte aussi bien des distorsions possibles au cours du transfert que des conditions habituelles de diffusion de l'ouvrage. Combien d'intentions réalisées à la perfection dans un studio ont-elles disparu lors de la présentation de l'œuvre au public ?

À aucun moment, le rôle de l'opérateur de prise de son ne peut et ne doit se limiter à une mise en œuvre passive de techniques de routine. Si la recherche d'une bande correcte, musicale ou intelligible est une des priorités impératives du métier, elle est loin d'être suffisante pour donner au message son caractère expressif et créateur.

Trop souvent la production – car c'est à ce niveau que se situent les carences – conçoit l'enregistrement sonore d'une œuvre audiovisuelle comme un accompagnement narratif ou illustratif de l'image. D'où l'apparition de procédés répétitifs et monotones qui neutralisent la réceptivité et la fascination. Il en résulte une uniformité des productions qui affecte même, le plus souvent, la retransmission des concerts ou, pire, des œuvres lyriques.

Mais l'enregistrement des sons est une discipline fallacieuse car le matériau qui doit être façonné est composé d'une substance impalpable que l'on nomme le champ acoustique.

Immatérielle et invisible, l'onde sonore possède la vertu d'être partout. Elle emplit l'espace, contourne les obstacles, traverse les parois. Elle est omniprésente et peut revêtir dans un environnement donné une infinité de formes diverses. Quiconque veut la capter et l'enregistrer peut le faire à tout moment et en tout point de l'espace.

Cette apparente facilité stimule les vocations et favorise la génération spontanée de nombreux « manipulateurs » de son parmi lesquels on peut même compter les automates toutes catégories qui envahissent les marchés de l'audiovisuel (ce qui montre le niveau de compétences nécessaire pour effectuer une simple mise en boîte d'échantillons sonores).

Cependant, le phénomène d'expansion du champ sonore présente diverses conséquences :

- la première est l'indivision des signaux. Dès que plusieurs sources situées à proximité l'une de l'autre émettent simultanément, la résultante en un point donné est un signal complexe dont il est difficile d'extraire ou d'isoler une information particulière ;
- la seconde est la nature dynamique du phénomène. Le son est une grandeur physique qui évolue continuellement dans le temps et l'espace. Cette fluctuation lui donne un caractère fugitif qui ouvre au preneur de son une multitude de possibilités. Face à ces options, il ne peut sélectionner ses signaux et moduler ses effets sans se trouver confronté à des problèmes d'une grande complexité, le plus souvent contradictoires : limité dans le temps, gêné par les bruits ou les signaux non pertinents, contraint de prendre en compte un grand nombre de critères, l'ingénieur du son ne peut agir efficacement sans posséder une réelle maîtrise de son art.

La prise de son sélective est en réalité d'une exigence inouïe qui ne laisse aucune part au hasard ou à l'improvisation. L'homme de métier doit pouvoir contrôler tous les paramètres qui interviennent et interfèrent dans son enregistrement : répartition spatiale du champ acoustique, position et sélectivité des microphones, dynamique des sons, rendu des timbres, présence des interprètes...

Cette maîtrise ne s'acquiert qu'au fil des ans et semble réservée à ceux qui valorisent certains dons naturels par l'acquisition de sérieuses connaissances techniques. Une bonne oreille, un sens aigu de l'observation et de la critique, beaucoup d'imagination, une grande capacité de renouvellement et de résistance à la routine constituent les qualités dominantes du professionnel qualifié mais elles sont loin d'être suffisantes. Chaque prise de son pose des problèmes spécifiques qui ne doivent laisser place ni aux recettes ni aux habitudes. D'où l'importance d'un acquis assez vaste pour permettre de recouvrir des disciplines d'une grande diversité.

Parmi celles qu'il est indispensable de maîtriser, citons :

le mode de rayonnement des sources, la propagation dans les milieux aériens, les effets de la présence d'obstacles sur le parcours des ondes-réflexions, absorption et diffusion sélective, les caractéristiques et les performances des transducteurs, capteurs ou émetteurs, le traitement du signal enregistré et les perturbations qu'il peut subir.

À ces différents aspects techniques, il convient d'ajouter la connaissance des problèmes posés par la restitution et la diffusion des œuvres, en prenant en compte les propriétés psycho-perceptives de l'audition, la psychologie des préférences et surtout le contexte culturel lié à la nature de la production...

C'est dans cet esprit que *Le livre des techniques du son* a été conçu et mis en œuvre. Conscient de l'importance de la pluridisciplinarité de la profession, Denis Mercier n'a pas cherché le spécialiste capable de traiter tous les aspects du métier, (qu'il n'aurait d'ailleurs pas trouvé) il a préféré s'adresser à divers professionnels plus particulièrement intéressés dans l'un ou l'autre des secteurs concernés. D'où cet ouvrage collectif qui répond bien à une double finalité : donner au preneur de son la possibilité de compléter ses connaissances dans les domaines qui lui sont le moins familier, et disposer d'un ouvrage de référence où il puisse chercher les réponses à des questions fondamentales d'ordre technique, technologique ou perceptif.

Le lecteur y trouvera la plupart des éléments qu'il peut être amené à utiliser dans l'exercice de cette discipline. Il pourra parcourir l'ouvrage dans le but d'acquérir ou de retrouver des notions fondamentales sur l'acoustique, la perception, la nature ou le traitement du signal enregistré. Il pourra compléter cette première approche par une étude plus détaillée des techniques mises en œuvre dans la réalisation d'un document sonore : aménagement ou traitement du local de prise de son, choix du matériel, modalités d'acquisition, de stockage et de restitution des informations sonores, etc. Il trouvera également un vaste éventail des technologies classiques ou récentes, analogiques ou numériques, qui lui permettront de mieux comprendre les évolutions rapides qui apparaissent à tous les niveaux des processus d'enregistrement, de transfert et de diffusion des signaux sonores.

Cet ouvrage s'adresse donc à l'amateur averti tout autant qu'au professionnel soucieux de combler quelques lacunes. Il offre une panoplie d'informations complexes et variées, mais l'acquisition de toutes ces notions ne doit nullement constituer le but ultime du preneur de son.

Ce dernier ne doit, en aucun cas, oublier que l'outil ne génère pas l'artisan. La pratique du métier, quelle que soit l'importance des moyens techniques qu'elle implique, est soumise aux mêmes règles et contraintes que tout autre instrument d'expression au service de la communication créative. Elle exige maîtrise, ferveur et imagination, et, dans ce domaine, plus encore que dans celui qu'évoquait Joffre : « pour pouvoir peu, il faut savoir beaucoup et bien ».

Jacques Jouhaneau

*À Émile Leipp et Jean Pujolle
en souvenir de leurs travaux.*

Table des matières

AVANT-PROPOS

XVII

CHAPITRE 1 – ACOUSTIQUE FONDAMENTALE

1.1	Sons et bruits : aspects objectifs et subjectifs	1
1.2	Mouvements vibratoires. L'oscillateur élémentaire à un degré de liberté	6
1.2.1	Oscillateur libre	6
1.2.2	Oscillations forcées, résonance	8
1.3	Systèmes à plusieurs degrés de liberté. Systèmes couplés	9
1.3.1	Généralités. Modes vibratoires	9
1.3.2	Cordes et barres vibrantes. Propagation d'ondes	13
1.3.3	Membranes et plaques vibrantes	17
1.3.4	Indication générale sur les plaques	22
1.3.5	Notions sur les vibrations et les ondes dans les corps solides	23
1.4	Nature et propagation du son	24
1.4.1	Caractéristiques des ondes sonores. Intensité et impédance. Vitesse de phase	24
1.4.2	Émissions – Propagation – Immission	28
1.4.3	Émission. Sources de bruit ; intensité, puissance	29
1.4.4	Échelles logarithmiques. Décibels	33
1.4.5	Propagation atmosphérique. Sol, écrans, parois	37
1.4.6	Analyse fréquentielle. Spectres, octaves	42
1.5	Bibliographie	45

CHAPITRE 2 – LES SOURCES ACOUSTIQUES

2.1	Les instruments de musique mécaniques. Principe de fonctionnement et classe de timbre	47
2.1.1	Structures vibrantes et générateurs des instruments de musique	47
2.1.2	Les deux classes acoustiques de sons instrumentaux	50
2.1.3	Quelques sons instrumentaux typiques	51

2.2	Dynamique	53
2.2.1	L'oreille et les dB : le crescendo instrumental	53
2.2.2	Sons impulsifs	54
2.2.3	La gamme dynamique de quelques instruments	54
2.3	Rayonnement des sources acoustiques	56
2.3.1	Données physiques sur le rayonnement des sources en champ libre	56
2.3.2	Données sur les modes vibratoires des tuyaux, et des plaques et membranes	57
2.3.3	Les méthodes d'études globales de la directionnalité	60
2.4	Timbre(s) des sources	65
2.4.1	Définitions : timbre identitaire et timbre qualitatif	65
2.4.2	Problèmes posés par l'étude acoustique du timbre	65
2.4.3	Analyse acoustique des deux constituants du timbre : identité et qualité	69
2.4.4	Champ de liberté en timbre des instruments de musique	72
2.4.5	Timbre, sonorité et émergence	73
2.5	Tessiture et contenu spectral	74
2.5.1	Définitions	74
2.5.2	Exemples	74
2.6	Voix parlée, voix chantée	76
2.6.1	Le signal vocal	76
2.6.2	L'intelligibilité de la parole	77
2.6.3	L'esthétique de la voix parlée ou chantée	79
2.6.4	Rayonnement de la voix chantée	81
2.6.5	Portée de la voix (sans micro)	81
2.7	Conclusions	82
2.8	Bibliographie	83

CHAPITRE 3 – ACOUSTIQUE ARCHITECTURALE

3.1	Acoustique des salles	85
3.1.1	Longueur d'onde et dimension des obstacles au cours de la propagation	86
3.1.2	Champs acoustiques au voisinage d'une paroi	90
3.1.3	Champ acoustique d'une salle par l'approche ondulatoire ; cas d'une salle parallélépipédique	94
3.1.4	Acoustique géométrique	103
3.1.5	Acoustique statistique	111
3.1.6	Somme d'un son direct et de sa réflexion	124
3.1.7	Absorbants et diffuseurs	126
3.1.8	Acoustique des studios et cabines de prise de son	136

3.2	Acoustique des lieux d'écoute	142
3.2.1	Définitions, généralités	142
3.2.2	Recherche de la meilleure adaptation	151
3.2.3	Critères d'appréciation d'une salle d'écoute	167
3.3	Isolement - Isolation	173
3.3.1	Isolement aux bruits aériens	173
3.3.2	Loi de masse - Loi des fréquences	178
3.3.3	Paroi composite, paroi multiple	186
3.3.4	Portes et baies vitrées - Parois hétérogènes	191
3.3.5	Isolation et bruits d'impacts	193
3.3.6	Ventilation/climatisation et isolation	197
3.3.7	Bruit de fond dans une salle	199
3.4	Bibliographie	200

CHAPITRE 4 – LA PERCEPTION AUDITIVE

4.1	Les propriétés de l'ouïe	203
4.1.1	Le champ auditif	203
4.1.2	Fréquence et intensité	205
4.1.3	La perception de la hauteur et de la durée	210
4.2	Les caractéristiques de l'audition	214
4.2.1	L'écoute naturelle	214
4.2.2	Les différentes étapes de la reconnaissance du timbre	222
4.2.3	L'écoute et la prise de son	224
4.3	Le système auditif humain	229
4.3.1	La structure de l'oreille	229
4.3.2	Mécanisme de l'audition	234
4.3.3	Les déficiences du système auditif	236
4.3.4	Exposimétrie bruit. Protections auditives	240
4.4	Conclusion	242
4.5	Bibliographie	242

CHAPITRE 5 – LE SIGNAL

5.1	La notion de signal. Notion d'information	245
5.1.1	Généralités	245
5.1.2	Complexité d'un signal. Dimension	247
5.1.3	Multiplexage	249
5.1.4	Échantillonnage	251

5.2	Modélisation des systèmes	253
5.2.1	Analyse des systèmes physiques	253
5.2.2	Convolution	253
5.2.3	Analyse spectrale	258
5.3	Filtrage et traitement	260
5.3.1	Filtrage analogique	260
5.3.2	Filtres échantillonnés à convolution	262
5.3.3	Filtres échantillonnés récursifs	265
5.4	Les canaux de transmission	266
5.4.1	Définition	266
5.4.2	Compatibilité débit-bande passante	266
5.4.3	Les défauts introduits	267
5.4.4	Défauts non linéaires	269
5.5	Transmission des signaux	274
5.5.1	Généralités	274
5.5.2	Les modulations d'amplitude	275
5.5.3	La modulation de fréquence et de phase	280
5.5.4	Les procédés numériques	285
5.5.5	Modulations hybrides	290
5.6	Bibliographie	291

CHAPITRE 6 – NOTIONS FONDAMENTALES DE L'ÉLECTRICITÉ

6.1	Fondements physiques de l'électricité	293
6.1.1	Champ électrique et potentiel	293
6.1.2	Effet chimique	304
6.1.3	Effet thermique	309
6.1.4	Effet magnétique	312
6.1.5	Origines physiques du bruit	338
6.2	Fonctions de l'électronique	341
6.2.1	Électrocinétique	341
6.2.2	Courants alternatifs	349
6.2.3	Quadripôles	357
6.2.4	Filtrage	366
6.2.5	Conclusion	378
6.3	Bibliographie	379

 CHAPITRE 7 – L'ENREGISTREMENT MAGNÉTIQUE

7.1	Principes fondamentaux de magnétisme et électromagnétisme	382
7.1.1	Champ magnétique	383
7.1.2	Matériaux ferromagnétiques	386
7.1.3	Induction magnétique	387
7.1.4	Flux d'induction magnétique	388
7.1.5	Perméabilité	389
7.2	Propriétés des corps ferromagnétiques	389
7.2.1	Courbe de première aimantation	389
7.2.2	Cycle d'hystérésis	390
7.2.3	Domaines de Weiss	391
7.2.4	Champ démagnétisant	392
7.3	Généralités sur l'enregistrement magnétique	394
7.3.1	Les supports	394
7.3.2	Le signal enregistré	394
7.4	Étude simplifiée des processus	397
7.4.1	Les têtes	397
7.4.2	L'effacement	399
7.4.3	Enregistrement	400
7.4.4	Lecture	400
7.4.5	Égalisation de lecture	402
7.5	Théorie de la lecture	403
7.5.1	L'effet d'entrefer	403
7.5.2	L'effet d'azimut	404
7.5.3	Effets d'éloignement et d'épaisseur	405
7.5.4	Autres effets de lecture	406
7.6	Théorie de l'enregistrement	407
7.6.1	Courbe de transfert	407
7.6.2	Polarisation alternative	408
7.7	Mesures et normes dans l'enregistrement magnétique	409
7.8	Bibliographie	411

 CHAPITRE 8 – LA TECHNOLOGIE AUDIONUMÉRIQUE

8.1	Signal numérique	415
8.2	Conversion	419
8.2.1	Conversion analogique-numérique	419
8.2.2	Conversion numérique-analogique	428
8.2.3	Système numérique	429

8.3	Traitement de l'information audionumérique	431
8.3.1	Caractérisation électrique	432
8.3.2	Dégradation de l'information numérique	435
8.3.3	Détection et correction d'erreurs	437
8.3.4	Entrelacement	448
8.3.5	Interpolation	450
8.4	Traitement du signal numérique	452
8.4.1	Module d'amplification ou d'atténuation	452
8.4.2	Module de retard	452
8.4.3	Module de filtrage numérique	456
8.4.4	Module de filtrage non linéaire	459
8.4.5	Module de commutation	460
8.4.6	Console de production numérique	460
8.4.7	Station de travail audionumérique	461
8.5	Compression de l'information numérique	462
8.5.1	Débit numérique et capacité	463
8.5.2	Techniques de réduction de débit du son	464
8.6	Enregistrement et reproduction	470
8.6.1	Exemples de formats utilisés sur bande magnétique	472
8.6.2	Exemples de formats utilisés sur disque à gravure mécanique	473
8.6.3	Enregistrement sur support informatique	474
8.6.4	Interconnexions numériques entre machines	475
8.6.5	Transmission numérique	477
8.7	Bibliographie	479

ANNEXE – RAPPEL DE NOTIONS DE MATHÉMATIQUES, PHYSIQUE, MÉCANIQUE

A.1	Rappel de quelques définitions	481
A.1.1	Fonctions Dérivées - Moyennes	481
A.1.2	Scalars - Vecteurs - Tenseurs	483
A.1.3	Quelques fonctions utiles en acoustique	484
A.1.4	Rapport des deux vecteurs - Nombre complexe	489
A.2	Grandeurs physiques - Unités	491
A.2.1	Unités fondamentales	491
A.2.2	Unité dérivées	491
A.2.3	Équation de dimension	493
A.3	Transformation de Fourier - Analyse fréquentielle	493
A.4	Mouvements vibratoires :	
	l'oscillateur élémentaire à un degré de liberté	495
A.4.1	Oscillateur libre	495

A.4.2	Force appliquée - Oscillations forcées	497
A.4.3	Énergies cinétique et potentielle	500
A.4.4	Les régimes transitoires	500

INDEX**503**

Collectif d'auteurs sous la direction de Denis Mercier

Denis Mercier

Preneur de son, réalisateur sonore sur des productions disques, films, spectacles, etc. Enseignant à l'ESAV de Marrakech. Ancien responsable des stages « son » de formation continue à Auvigraph, ENS Louis-Lumière.

Patrice Bourcet (chapitre 1 et annexes)

Ingénieur CNAM. Ancien responsable des programmes de recherche du centre R&D de TDF à Metz.

Michèle Castellengo (chapitre 2)

Directrice de recherches émérite (CNRS), L.A.M. – Institut d'Alembert (UMR 7190) – Université Paris 6.

Éric Vivié (chapitre 3 : § 3.1 et 3.3)

Maître es mathématiques. DEA en acoustique appliquée de la Faculté des sciences du Mans. Fondateur du BET Acoustique Vivié et Associés. Ancien professeur d'acoustique architecturale à l'ENS Louis-Lumière.

Michel Cassan (chapitre 3 : § 3.2)

Diplômé d'études supérieures en acoustique à Paris VI. Ancien responsable de l'acoustique des salles aux services techniques de Radio France.

M'Paya Kitantou (chapitre 4)

Docteur en acoustique. Ancien responsable d'actions de formation à l'Institut national de l'audiovisuel (INA).

Jacques Foret (chapitre 5)

Docteur en électro-acoustique. Ingénieur conseil en acoustique. Professeur d'acoustique et de traitement du signal.

Mohammed Elliq (chapitre 6)

Enseignant d'électronique appliquée à l'audiovisuel à l'ENS Louis-Lumière. Responsable du département d'électronique de l'ENS Louis-Lumière. Docteur en électronique de l'ULP de Strasbourg.

Michel Calmet (chapitre 7)

Ingénieur en chef des télécommunications. Ancien conseiller technique à Radio France.

Jacques Fournet (chapitre 7)

Ancien chef du département audio-vidéo professionnel Agfa-Gevaert France.

Alain Fromentel (chapitre 8)

Ingénieur diplômé Supélec. Directeur des Études de l'EFREI – École d'Ingénieurs.

Avant-propos

Écrire un livre sur le son, c'était nouveau lorsque nous avons entrepris ce projet à la fin des années 1980. Depuis de l'eau a coulé sous les ponts, les technologies dans le domaine de l'audio professionnel et de la communication ont évoluées à une vitesse faramineuse. On peut trouver des informations sur Internet, visiter le site d'un constructeur et visionner un tutoriel en ligne, et c'est vraiment très pratique... mais lorsque l'on cherche une information précise, validée, avec des schémas utiles, un index complet et des développements rédigés par des professionnels confirmés... un livre technique de référence reste une valeur sûre. D'où notre souci de réactualiser *le Livre des techniques du son* en proposant cette cinquième édition remise à jour.

En effet, pour travailler sérieusement dans les métiers du son, la connaissance des notions fondamentales s'avère un instrument indispensable. C'est pourquoi nous avons conservé les bases théoriques dans ce premier volume, présentées sous une forme accessible. Il reste certes quelques équations mais elles sont là pour permettre de mieux comprendre les phénomènes avec les différentes composantes et les ordres de grandeur. C'est ainsi que le chapitre 6 sur les notions fondamentales de l'électricité et les fonctions de l'électronique a été entièrement revu par un nouvel auteur qui enseigne dans une grande école.

Je profite d'ailleurs de l'occasion pour remercier l'ensemble des auteurs, ceux qui ont rédigé les chapitres de cette édition mais aussi ceux qui ont travaillé sur les éditions précédentes. En effet leur disponibilité et leur souci d'être toujours à la pointe dans leur domaine sont les dénominateurs communs de l'investissement de ce collectif d'auteurs.

Ce tome 1 sur les notions fondamentales est le premier de la série de trois. Des renvois permettent de replacer chaque notion en face des technologies et des modes d'exploitation qui sont présentés dans les autres volumes de cette collection.

Les titres des chapitres du tome 2 *La technologie* sont les suivants : 1 Introduction à la technologie audiofréquence – 2 Les microphones – 3 Les enceintes acoustiques – 4 Les consoles – 5 Le traitement du son – 6 Les systèmes d'enregistrement et les réseaux audio – 7 La synchronisation – 8 Les sources électroniques et le MIDI – 9 Analogies.

Et les titres des chapitres du tome 3 *L'exploitation* sont : 1 La prise de son stéréophonique – 2 Les supports audio – 3 Le studio d'enregistrement – 4 La sonorisation – 5 Le théâtre – 6 La radio – 7 Le cinéma sonore – 8 La télévision.

Que cet ouvrage continue à servir de référence dans les studios, les audits, sur les plateaux de théâtre et de cinéma... dans les écoles et les stages de formation... en France mais aussi partout dans le Monde.

C'est tout ce que nous souhaitons et ce pourquoi nous avons œuvré.

Bonne lecture, et bonne séance, bon spectacle... ou bon tournage !

Denis Mercier

Chapitre 1

Acoustique fondamentale

Patrice Bourcet

*Ingénieur CNAM. Ancien responsable des programmes
de recherche du centre R&D de TDF à Metz*

*(en collaboration avec **Pierre Liénard** pour les précédentes éditions)*

1.1 Sons et bruits : aspects objectifs et subjectifs

Les fluctuations rapides (plusieurs dizaines, jusqu'à des milliers de fois par seconde) de la pression de l'air au niveau de nos oreilles engendrent une sensation auditive, et le mot SON désigne à la fois la *vibration physique* capable d'éveiller cette sensation et la *sensation* elle-même.

Cette constatation s'impose dès que l'on tente une définition du son [1], et constitue l'une des clefs de l'approche avertie des problèmes liés à la nature du son. Les philosophes et physiciens du XVIII^e siècle ont eu à ce sujet de vives discussions : « Y a-t-il un *son* lorsque personne n'est là pour l'entendre ? »

Même si de nos jours cette question peut faire sourire, le problème de ces deux aspects du phénomène sonore est toujours une source de confusion.

Le son possède un aspect *objectif* et peut ainsi être considéré comme une *cause*, *objet* naturel des sciences et techniques. Sous son aspect *subjectif* le son est un *effet* étroitement dépendant du *sujet* qui le ressent.

La difficulté mais aussi l'intérêt de cette recherche résident dans le fait que cause et effet appartiennent à des domaines différents : physique, physiologie, psychologie, sociologie et art (musique et architecture). Il faut prendre conscience de cette répartition pour comprendre à la fois le discours d'un physicien et celui d'un musicien (et du spécialiste des salles d'écoute...) lorsqu'ils parlent du son.

Objectivement, le son est un phénomène physique d'origine mécanique, une perturbation locale de pression, de vitesse vibratoire ou de densité de fluide, qui se propage en modifiant progressivement l'état de chaque élément du milieu ébranlé, donnant ainsi naissance à une *onde* acoustique, onde dont l'*image classique* est celle des ronds dans l'eau. La vitesse avec laquelle se propage cette perturbation, ou *célérité* du son, est caractéristique du milieu de propagation et de son état thermodynamique. *Subjectivement*, le son est une *sensation* traduisant la perception par le cerveau d'un *événement* qui véhicule une information en provenance du monde extérieur.

Notons que même en nous limitant au milieu que constitue l'air ambiant, toutes les vibrations de nature acoustique (ondes de pression) ne donnent pas forcément une sensation auditive. Certaines seront imperceptibles, car trop faibles, d'autres seront trop lentes (infrasons : au-dessous de 20 ou 25 oscillations par seconde) ou trop rapides (ultrasons : au-dessus de 15 000 ou 20 000 oscillations par seconde), limites variables d'ailleurs suivant les individus et leur âge.

Mais revenons un instant sur l'*image classique* des ronds dans l'eau (*figure 1.1*). Pour autant qu'elle soit de nature à développer la compréhension physique du phénomène de propagation, cette image est celle d'une onde dite *transversale*. En effet, le caillou qui tombe dans l'eau et qui provoque l'ébranlement initial de la surface de l'eau au repos est essentiellement un mouvement perpendiculaire au plan de l'onde qui en découle. Le caillou joue le rôle de *source* ou d'*émetteur* de l'onde.

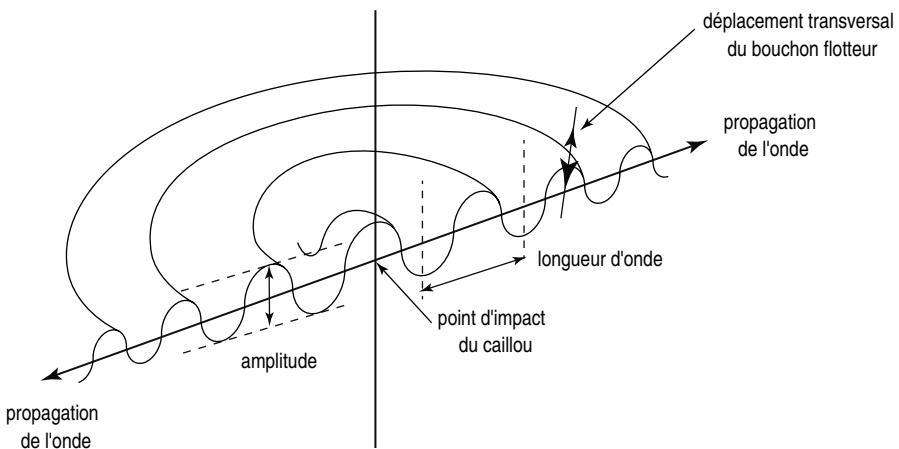


Figure 1.1 — L'image classique des ronds dans l'eau avec le phénomène de propagation des ondes transversales.

Le bouchon de la ligne d'un pêcheur situé un peu plus loin, sensible à cette onde, jouera le rôle de *récepteur de l'onde* et va se mettre à osciller sur place, effectuant un mouvement perpendiculaire à la direction de déplacement de l'onde.

Dans cette analogie avec une onde acoustique, ce qu'il faut retenir est le fait que c'est bien une réplique de la perturbation initiale qui se propage de l'émetteur au récepteur et non la matière elle-même. Pour preuve, le bouchon ne se déplace pas dans la direction de propagation, il n'y a pas de courant d'eau, de même que pour une onde acoustique il n'y aura aucun courant d'air.

Par contre, il existe une différence importante dans la mesure où l'onde acoustique est une onde dite *longitudinale*, ce qui signifie que la perturbation initiale est un mouvement ayant la même direction que celle de la propagation de l'onde (*figure 1.2*). En conséquence, un élément sensible à cette onde, capable de jouer le même rôle de récepteur que notre bouchon dans l'eau, va se déplacer en oscillant parallèlement à la direction de déplacement de l'onde. C'est exactement ce que fait, par exemple, le tympan de notre oreille stimulée par une onde sonore.

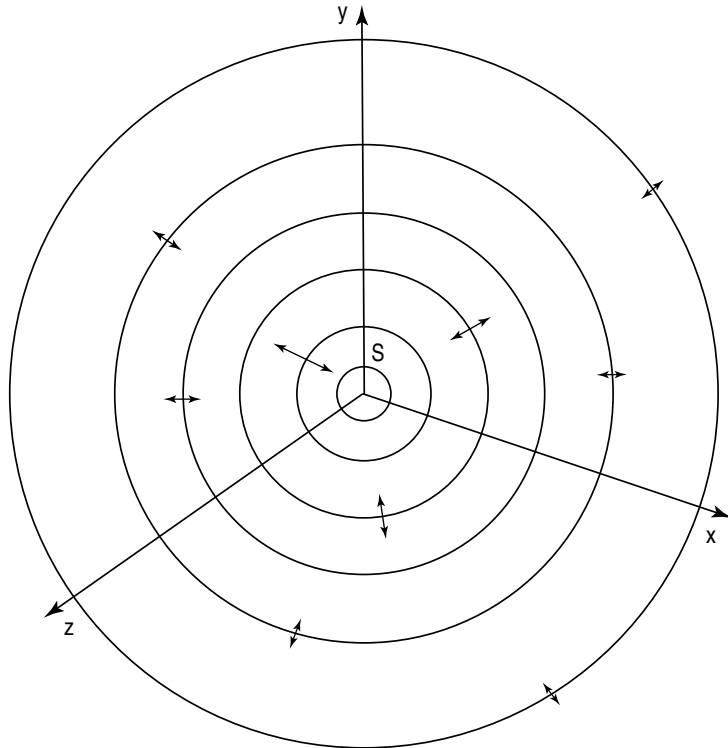


Figure 1.2 — Une source sonore omnidirectionnelle envoie des ondes dans l'espace qui se propagent à 360° autour d'elle et crée des variations de pression acoustique (représentées par des flèches) qui vont en s'atténuant avec la distance.

L'onde sonore est une succession de compressions et de dépressions (raréfactions) qui se propagent en perturbant rapidement la pression atmosphérique pratiquement constante de l'air au repos. Au passage de l'onde, les éléments matériels constitutifs de l'air ambiant oscillent parallèlement à sa direction de propagation pour revenir à leur position d'équilibre lorsque la perturbation cesse. Propagation et mouvement local suivent la même direction, l'oscillation se faisant alternativement dans un sens puis dans l'autre le long de cette direction.

Une meilleure image de l'onde acoustique serait donc la propagation du pincement de l'extrémité d'un ressort à boudin légèrement tendu vers son autre extrémité, mais cette image ne fait pas naturellement partie de notre expérience courante.

De plus, ces images sont des analogies à une ou deux dimensions alors qu'un son est une onde qui se propage dans les trois dimensions de l'espace.

Le *son* le plus simple, au sens physique, est une oscillation sinusoïdale de pression, analogue à celle de l'oscillateur simple ou du pendule (voir annexe A1), caractérisé par une période T , stable, dont l'inverse est la fréquence $f = 1/T$ mesurée en *hertz* (Hz, 1 Hz = 1 oscillation par seconde, 1 kHz = 1 000 Hz). On utilise souvent dans les calculs la grandeur $\omega = 2\pi f$, ou *pulsation*.

On rencontre rarement un « son pur », de seule fréquence f , mais le plus souvent, une composition d'un grand nombre d'oscillations ayant des fréquences diverses.

Si ces fréquences sont une fréquence dite *fondamentale* et ses multiples $2f, 3f, 4f \dots nf$, dites harmoniques, la sensation auditive est un son *musical*. La superposition de fréquences ayant des *rappports simples* donne une sensation agréable d'*accords musicaux*. Les sons dont les fréquences ne sont pas des multiples de la fréquence fondamentale sont appelés « partiels » ; par exemple : un son de cloche. Ils peuvent contribuer au « timbre » du son mais sont parfois désagréables (voir § 2.4).

On appelle physiquement *bruit* une perturbation de pression sonore qui n'est pas seulement formée d'un nombre fini de fréquences fixes, mais aussi d'oscillations aléatoires ayant une composition spectrale continue (par exemple, bruit d'une chute d'eau, d'un jet de vapeur...). La plupart des bruits naturels comportent à la fois, des oscillations de fréquences plus ou moins fixes, ayant entre elles des rapports quelconques, et des fluctuations à large bande fréquentielle. Du point de vue *subjectif*, on appelle *bruit* toute manifestation sonore non *désirée*, donc perturbatrice, par rapport à un état souhaité, ou pour la perception d'un *signal* (parole, musique...).

On voit que ces deux définitions ne coïncident pas forcément : si un « son » formé de fréquences quelconques, ni harmoniques, ni harmonieuses, peut être désagréable, le « bruit » d'une cascade peut être agréable, et le bruit du train qui entre

en gare est une information utile, alors qu'une mélodie entendue à travers une cloison quand on veut s'endormir est un bruit « perturbateur ».

Le problème de savoir si le spectre fréquentiel d'un signal acoustique est un spectre de *raies* (c'est-à-dire constitué d'un certain nombre de fréquences distinctes ou fréquences *pures*) ou bien un spectre *continu* (c'est-à-dire constitué d'une infinité de fréquences réparties suivant une certaine *densité*) est en fait étroitement lié au degré d'approximation que l'on se donne.

Cette approximation peut être soit d'ordre théorique, soit d'ordre expérimental (dans le cas de l'analyse spectrale au moyen d'appareils de mesure).

En toute rigueur, les spectres de raies n'existent que sur... le papier. En effet, une fréquence pure (en acoustique une oscillation sinusoïdale de pression) n'est strictement un son *pur* (son entièrement défini par une sinusoïde) que si sa forme est parfaitement sinusoïdale.

Toute *altération* de la forme d'une sinusoïde est significative de la présence... *d'autres sinusoïdes*.

- Si l'altération conserve au signal sa périodicité, les autres « sinusoïdes » sont harmoniques $2f, 3f, 4f, \dots, nf$, donc encore des fréquences pures.
- Si l'altération est elle-même périodique, mais sans rapport simple avec la périodicité de la fréquence fondamentale f , les autres « sinusoïdes » sont des partiels donc toujours des fréquences pures.
- Par contre, si l'altération est quelconque ou réside tout simplement dans le fait inévitable que notre sinusoïde doit avoir en pratique un début et une fin, les « autres sinusoïdes » sont alors nécessairement sous la forme d'une densité spectrale assimilable à une infinité de sinusoïdes.

Il en résulte qu'utiliser la notion de fréquence pure ou de spectre de raies, c'est nécessairement faire abstraction de phénomènes tels que l'établissement ou l'extinction d'un son et plus généralement de tout ce qui est *transitoire* pendant la durée de vie d'un signal.

En d'autres termes, c'est mettre en évidence les aspects répétitifs du phénomène au détriment de ses aspects évolutifs.

Les phénomènes naturels ayant généralement plus ou moins les deux aspects, on comprend la difficulté d'une classification simple basée sur leur analyse fréquentielle. Quoi qu'il en soit, SONS et BRUITS relèvent des mêmes phénomènes physiques et nous verrons que tous les mouvements oscillants sans exception peuvent être décrits en termes de fréquences. En conséquence, la notion de fréquence, donc de *mouvement sinusoïdal* constitue *l'élément simple* le plus intéressant à utiliser comme base de tous les phénomènes vibratoires.

1.2 Mouvements vibratoires. L'oscillateur élémentaire à un degré de liberté

1.2.1 Oscillateur libre

Pour faire du bruit ou produire un son, il faut qu'il y ait « quelque chose qui remue ». Essayons d'imaginer le système le plus élémentaire possible effectuant le mouvement le plus simple.

« Quelque chose » : de quoi s'agit-il ?

Peu importe, l'essentiel est de prendre conscience que ce quelque chose a nécessairement une *masse*. Il nous est donc impossible de ne pas faire intervenir au moins une masse, par contre il est possible de la réduire à sa plus simple expression, c'est-à-dire un point matériel sans forme et sans volume, de masse M .

« Qui remue » : de quel mouvement s'agit-il ?

Nous savons qu'une onde acoustique a pour origine une perturbation qui se propage et non une masse qui se propage (un courant d'air !) notre masse doit donc remuer sur place. Ceci implique qu'elle possède une *position de repos* et que le mouvement dont il est question ne peut être qu'un déplacement autour de cette position.

Dans ces conditions, le déplacement le plus simple est un déplacement suivant une seule direction, de part et d'autre de la position de repos. On dit que le mouvement n'a qu'un degré de liberté, il peut être décrit à l'aide d'une seule variable x représentant, dans un sens, l'élongation positive comptée à partir de la position de repos et dans l'autre sens, l'élongation négative du mouvement.

Pour être en mesure d'effectuer un tel mouvement, notre masse élémentaire ne doit pas être liée de façon fixe ou rigide à un support, de plus dès la perturbation passée, elle doit reprendre « naturellement » sa position de repos qui, de ce fait, est nécessairement une *position d'équilibre*.

De quelle liaison s'agit-il ? Peu importe, l'essentiel est de voir que cette liaison doit nécessairement être de nature *élastique* pour permettre le mouvement et le retour à la position d'équilibre.

Il nous est donc impossible de ne pas faire intervenir une certaine élasticité. Par contre, comme pour le premier élément de notre système, la masse M , il est possible d'imaginer l'élasticité la plus simple, c'est-à-dire une force de rappel proportionnelle à l'*élongation*. Soit K le coefficient de proportionnalité que l'on appellera la *raideur* de la liaison (*figure 1.3*).

Le système que nous venons d'imaginer constitue l'oscillateur mécanique le plus élémentaire à un degré de liberté. En effet, imaginons que l'on écarte notre

masse M de sa position d'équilibre, l'énergie que nous confions ainsi au système s'accumule sous forme de tension dans la liaison élastique. Si nous libérons le système celui-ci va conserver son énergie mais cette dernière va osciller éternellement de la forme potentielle qu'elle a lorsque la tension de la liaison est maximum (d'un côté ou de l'autre) à la forme cinétique qu'elle a lorsque la masse atteint sa vitesse maximum au niveau de sa position d'équilibre (dans un sens ou dans l'autre).

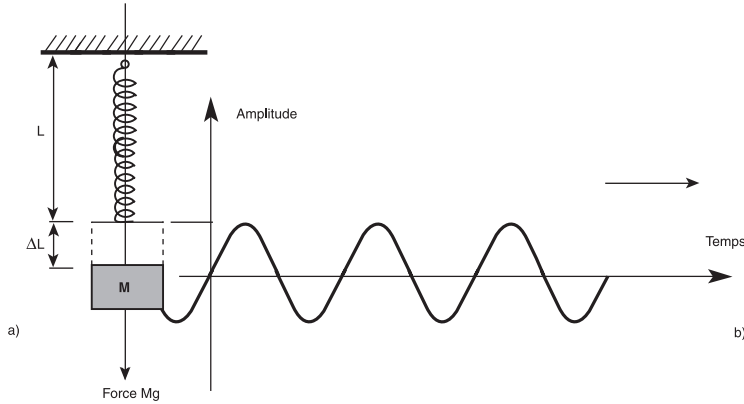


Figure 1.3 – Oscillateur simple à un degré de liberté.

Une masse M accrochée à un ressort de raideur K et de longueur L au repos, lui impose un allongement statique $\Delta L = Mg/K$. Si on déplace cette masse,

$$\text{elle oscille ensuite avec une fréquence } f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}.$$

S'il n'y a pas d'amortissement, son oscillation en fonction du temps, telle qu'elle peut s'inscrire sur une feuille se déplaçant uniformément, est une sinusoïde d'amplitude constante, de période $T = 1/f$.

Le mouvement de la masse est alors parfaitement sinusoïdal, il est caractérisé par une fréquence qui ne dépend que de M et de K et que l'on appelle la fréquence

propre du système : $f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$. Chacun sait que le système que nous venons

d'imaginer ne fonctionne que sur le papier car ce serait le mouvement perpétuel. Si on essaye de valider réellement un tel système, en accrochant par exemple une masse M à l'extrémité d'un ressort K , dont l'autre extrémité est fixée à un support (figure 1.4), on s'aperçoit qu'il n'est jamais possible de négliger totalement, comme nous l'avons fait, les pertes d'énergie notamment par frottement. Il nous faut donc introduire en plus des termes d'inertie (masse M) et d'élasticité (inverse de la raideur, $\frac{1}{K}$) un troisième terme « de frottement » comportant un coefficient b pour tenir compte des inévitables pertes du système.

Le mouvement naturel de notre oscillation libre va donc subir une diminution d'amplitude d'autant plus rapide que les pertes sont importantes.

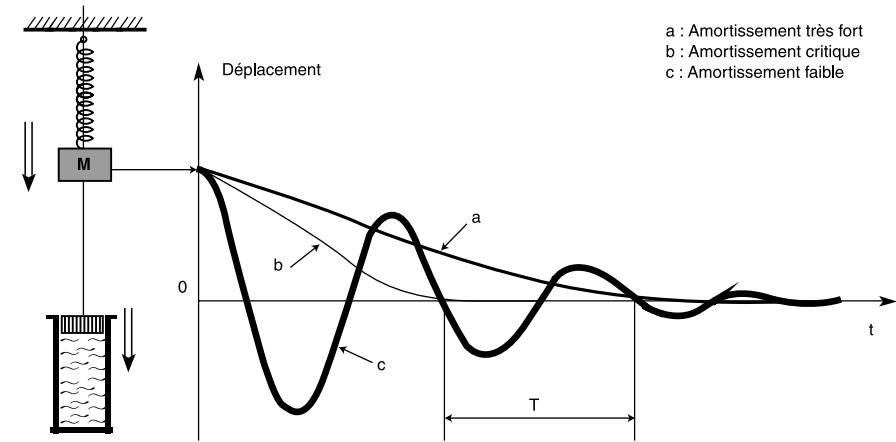


Figure 1.4 — Oscillateur simple amorti.

- a) Si l'amortissement est très fort, la masse revient lentement à sa position initiale, sans oscillation.
 b) L'amortissement critique : le retour à l'équilibre est le plus rapide possible sans oscillation donc sans dépassement de la position d'équilibre.
 c) Si l'amortissement est faible, la masse décrit une sinusoïde amortie.

Pour ne pas décourager dès les premières lignes de ce livre, le lecteur peu familier des mathématiques, l'étude détaillée du mouvement d'un oscillateur élémentaire a été reportée en annexe (A4.1 à A4.4), ce qui ne nous empêche pas ici de présenter les idées essentielles qui découlent de cette étude.

1.2.2 Oscillations forcées, résonance

Le seul moyen d'obtenir de notre oscillateur une amplitude constante consiste à entretenir son mouvement à l'aide d'un apport constant d'énergie. Le plus simple (non pas à réaliser mais du point de vue de l'étude), est d'appliquer au système une force extérieure sinusoïdale. Dans ces conditions, on obtient deux comportements remarquables de notre système :

Les pertes sont importantes

On peut alors considérer que l'énergie d'entretien est consommée très rapidement. Le système effectue les oscillations imposées avec une amplitude à peu près constante pour les fréquences basses ou les fréquences inférieures à sa fréquence propre.

Ensuite, si la force extérieure est d'amplitude constante, on constate avec l'augmentation de fréquence imposée une nette diminution du mouvement essentiellement imputable à une cause très intuitive qui est l'inertie de la masse M .

Les pertes sont faibles

On conçoit alors aisément que l'énergie confiée au système est, au moins au départ de l'expérience, supérieure à l'énergie strictement nécessaire à l'induction d'un mouvement d'amplitude donnée. L'énergie en excès a alors tout naturellement tendance à s'accumuler dans le système, ce qui augmente son amplitude, d'où des pertes plus importantes qui finissent par épuiser l'excès d'énergie. Le mouvement atteint ainsi son équilibre avec un certain gain en amplitude, ce qui peut paraître surprenant pour un système passif.

Étant donné que l'excès d'énergie a tendance à s'accumuler au voisinage de la fréquence propre du système (qui est, rappelons-le : une fréquence où un oscillateur sans perte conserve indéfiniment son énergie), le phénomène d'augmentation d'amplitude est maximum lorsque la fréquence d'excitation est peu différente de la fréquence propre du système. C'est le phénomène bien connu pour ses effets que l'on nomme *résonance*.

Ce phénomène peut être utilisé avec profit pour stocker de l'énergie et obtenir des effets « d'amplification ».

Dans d'autres cas, il constitue une gêne qu'il faut combattre.

L'essentiel à retenir est qu'un système oscillant, même élémentaire, tel que celui que nous avons décrit, possède nécessairement au moins une fréquence propre et qu'au voisinage de cette fréquence, la manifestation d'une résonance est inévitable dès lors que les pertes sont faibles. Il est donc impossible d'éviter l'association pertes faibles/résonance ou pertes élevées/absence de résonance.

1.3 Systèmes à plusieurs degrés de liberté. Systèmes couplés

1.3.1 Généralités. Modes vibratoires

L'étude de l'oscillateur simple, à 1 degré de liberté, permet de bien préciser les phénomènes essentiels. Mais bien peu de systèmes réels peuvent être représentés par ce modèle simple et il est rare qu'un système vibrant n'ait qu'un seul degré de liberté. Il suffit par exemple d'ajouter une masse au milieu du ressort de la *figure 1.3* pour obtenir un système à deux degrés de liberté (les mouvements des deux masses) couplés, car les deux ressorts (élasticité) et les deux masses (inertie) réagissent les uns sur les autres.

Un corps même indéformable, libre dans l'espace, tel un avion (figure 1.5) peut se déplacer suivant trois axes (avancement, montée-descente, dérapage) et osciller autour de ceux-ci (roulis, tangage, lacet), soit 6 degrés de libertés, couplés par les réactions aérodynamiques.

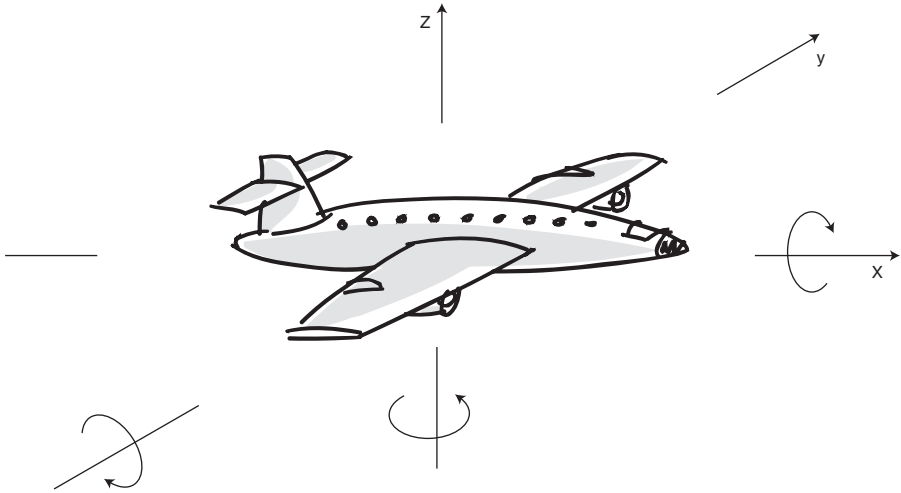


Figure 1.5 — Corps libre dans l'espace :
6 degrés de liberté, couplés par des réactions aérodynamiques
(3 de translation et 3 de rotation).

Même si une partie d'un système peut être assimilée à un oscillateur simple, elle a cependant des liaisons avec d'autres parties, et son fonctionnement ne peut être envisagé isolément : il y a « couplage » car elle réagit aussi sur les efforts que les autres lui appliquent. Le comportement d'ensemble ne peut plus être considéré comme une simple juxtaposition du comportement de chacune de ses parties.

Enfin, peu de systèmes réels possèdent une raideur K , ou un amortissement b constant, quelles que soient l'élongation ou la vitesse : on dit qu'ils sont « non linéaires » c'est ainsi que le caoutchouc présente une raideur croissante avec l'effort appliqué en compression.

Le comportement de ces oscillateurs est plus complexe que celui décrit dans l'annexe ; on retrouve néanmoins les phénomènes de fréquences propres et de résonance ; il apparaît en plus des modes « vibratoires » et des anti-résonances (passage d'amplitude par des minimums). Mathématiquement, les problèmes sont décrits par des équations différentielles analogues à celles de l'oscillation simple (voir annexe), mais « non linéaires » car les coefficients K , b , ne sont plus constants mais variables avec amplitude ou vitesse, et des équations de couplage expriment les liaisons de diverses parties. Ces équations sont résolubles analytiquement dans les cas simples, telles que figures 1.6 et 1.7 et numériquement par

ordinateurs après avoir décomposé le système en éléments simples, non infiniment petits (éléments finis), pour que leur nombre soit aussi petit que possible.

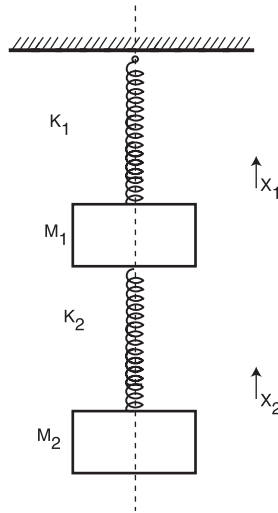


Figure 1.6 – Oscillateur à deux degrés de liberté.

On démontre qu'un système à n degrés de liberté (par exemple constitué de n masses élémentaires liées par des ressorts, figure 1.7) possède n fréquences propres.

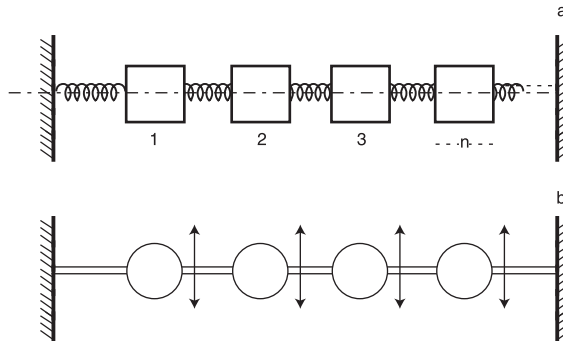


Figure 1.7 – Système à n degrés de liberté.
 a) n masses et n ressorts (ou $n + 1$); b) corde à n masses concentrées.

Il en résulte une courbe de réponse amplitude-fréquence possédant n maximums correspondant à n résonances possibles et séparées par autant d'anti-résonances. La distribution caractéristique de ces amplitudes dans la géométrie du système constitue le *mode* de vibration du système.

Le mode normal correspondant à la fréquence propre la plus basse s'appelle le *mode fondamental*, pour lequel toutes les masses vibrent en phase. Le mode normal le plus élevé est le mode d'ordre n ; pour celui-ci, chaque masse élémentaire vibre en opposition de phase par rapport aux masses adjacentes.

Une illustration simple est donnée par une corde élastique sur laquelle sont enfilées n masses égales et équidistantes (*figure 1.7*), se déplaçant perpendiculairement à la corde, rectiligne au repos.

S'il n'y a qu'une masse, cet oscillateur simple n'a qu'un mode et une fréquence propres. À part les deux extrémités, il n'y a pas de points immobiles, le mode est d'ordre zéro (fondamental).

Avec 2 masses, il y a deux modes possibles (*figure 1.8*), le fondamental (ordre zéro, comme précédemment) et le mode 1, pour lequel un point de la corde reste immobile. Avec n masses, il est possible d'observer n modes d'ordre 0 à $n - 1$ (on les numérote parfois de 1 à n). Dans chaque figure, on observe, outre les extrémités, des points qui restent fixes, appelés *nœuds*, entre lesquels se placent les maximums d'amplitude, ou *ventres*. Le nombre de nœuds donne le numéro du mode dans la première numérotation, le nombre de ventres dans la deuxième.

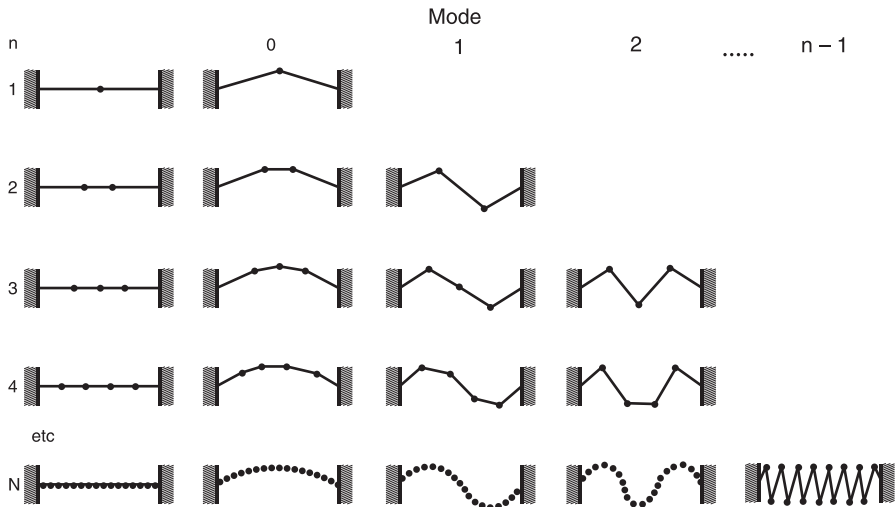


Figure 1.8 — Modes transversaux d'une corde continue.

Si le nombre de masses augmente indéfiniment, on obtient la corde vibrante continue (voir *figure 1.9*), ayant une certaine densité linéique, qui peut donc présenter un nombre infini de modes. Pratiquement, les modes élevés sont toujours beaucoup plus amortis et disparaissent plus rapidement que les autres après excitation de la corde.