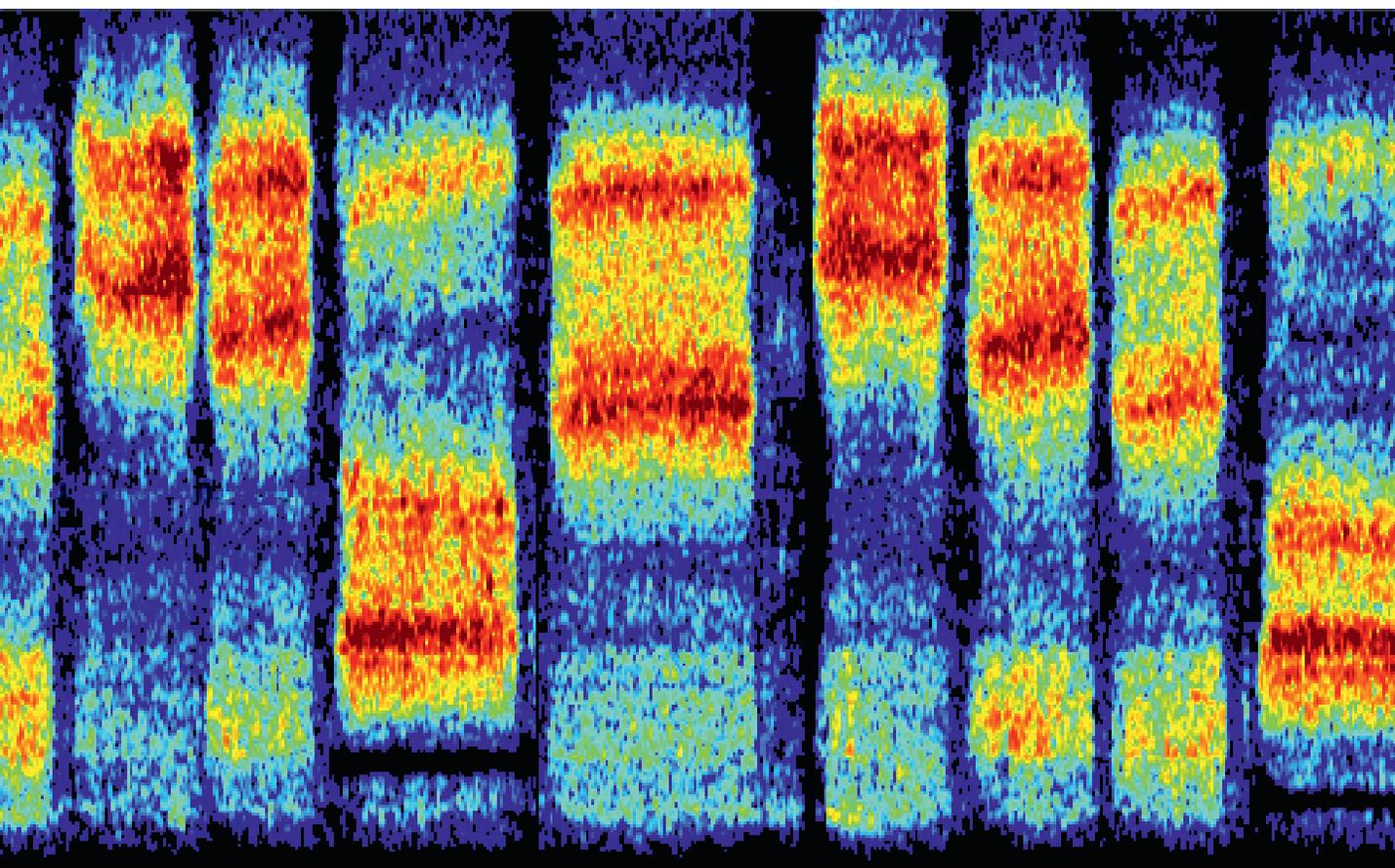


Michèle Castellengo

ÉCOUTE MUSICALE ET ACOUSTIQUE

Avec 420 sons et leurs sonagrammes décryptés



Sur le DVD-Rom d'accompagnement

- Des « livrets-sons » au format ePub pour l'écoute sur Smartphone
- Le livre complet en PDF avec les 420 sons intégrés

EYROLLES

Crédits iconographiques

Sauf mention particulière, tous les sonagrammes ont été réalisés par l'auteur à l'aide du logiciel AudioSculpt de l'Ircam.

Les sources des illustrations qui n'ont pas été réalisées par l'auteur elle-même sont mentionnées dans leur légende, à l'exception des schémas des figures 6, 7 et 1.1, réalisés par Antoine Moreau-Dusault.

L'éditeur a fait tout son possible pour identifier les ayants droit des visuels présentés. Si toutefois l'un d'eux avait été oublié, il est invité à se mettre en contact avec les Éditions Eyrolles.

Source et copyright des sons

Le concept de ce livre repose sur la fourniture de nombreux exemples choisis parmi des œuvres existantes ou réalisés spécialement pour permettre une écoute riche en contexte musical. La source des séquences sonores est indiquée entre crochets dans la section *Les sons du chapitre x* placée à la fin de chaque chapitre. Par exemple :

Son 6.27 – Guimbarde et chant harmonique de style sygyt. Successivement : jeu de la guimbarde (fondamental à 88,5 Hz) ; 13" guimbarde et voix (à l'octave supérieure de la guimbarde) ; 30" deuxième séquence voix et guimbarde ; 45" guimbarde seule. *Tuva, Voices from the Center of Asia* ; n° 16 ; Smithsonian Folkways Records, 1990. [SF 40017]

Toute reproduction ou représentation de ces sons est interdite sans l'accord de leurs ayants droit.

De nombreux sons proviennent de la base de données RWC Music Database. Les demandes d'autorisation de reproduction de ces sons peuvent être faites directement sur le site <https://staff.aist.go.jp/m.goto/RWC-MDB/>.

Les sons créés par l'auteur, référencés [M. C.], sont utilisables librement pour l'enseignement et la recherche (cours, conférences) à condition d'en citer la source sous la forme suivante :

Extrait du DVD-Rom d'accompagnement de l'ouvrage *Écoute musicale et acoustique* de Michèle Castellengo, Éditions Eyrolles, 2015.

Pour tout autre usage, il est nécessaire d'obtenir l'autorisation de l'auteur (michele.castellengo@upmc.fr).

Aux termes du Code de la propriété intellectuelle, toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle de la présente publication, faite par quelque procédé que ce soit (reprographie, microfilmage, scannérisation, numérisation...) sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle. L'autorisation d'effectuer des reproductions par reprographie doit être obtenue auprès du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) – 20, rue des Grands-Augustins – 75006 Paris.

© Groupe Eyrolles, 2015
ISBN : 978-2-212-13872-6

ÉDITIONS EYROLLES
61, bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

CHAPITRE 1

DES VIBRATIONS AUX SONS DE LA MUSIQUE

Le silence éternel de ces espaces infinis m'effraie. Pensées, Blaise Pascal

1. À l'origine du son : le mouvement

Pour commencer nous évoquerons l'impression étrange que l'on ressent lorsque l'on entre pour la première fois dans une pièce anéchoïque, plus couramment appelée « chambre sourde ». Dans ce lieu isolé des bruits environnants et garni de matériau absorbant règne un silence qui surprend. Les seuls sons que nous percevons, qui prennent une dimension nouvelle, presque angoissante, proviennent du fonctionnement interne de notre propre corps : battements du cœur, sifflements d'oreille. Nous prenons soudain conscience du lien direct entre son et mouvement. En effet, la chambre sourde est un lieu spécialement construit pour y effectuer des mesures acoustiques dans le plus grand silence. C'est donc un lieu privé de vie, isolé du monde extérieur, au sein duquel aucun événement accidentel ne peut se produire. En sortant, nous retrouvons avec plaisir le bruit des pas amplifié par la résonance du couloir, puis le brouhaha extérieur, signe sonore de la présence active des êtres qui sont autour de nous. Le monde dans lequel nous vivons *bruit* des mouvements naturels du vent et de l'eau et de ceux des êtres vivants qui se meuvent, communiquent ou produisent de la musique pour leur seul plaisir.

À l'origine d'un son, il y a donc un mouvement et, pour effectuer un mouvement, il faut dépenser de l'énergie. En d'autres termes, lorsqu'on entend un son, il s'est produit – ou il est en train de se produire – un événement, proche ou distant, dont l'onde sonore porte la trace matérielle jusqu'à nos oreilles.

2. La production et la propagation des sons

2.1. En bref

Depuis le mouvement initial jusqu'au son entendu, plusieurs processus sont mis en œuvre (figure 1.1).

- *L'excitation*, qui est à l'origine du mouvement, apporte plus ou moins d'énergie, ce qui produit un son plus ou moins intense. Si elle est de nature impulsionnelle – un choc, un pincement comme pour la guitare –, la totalité de l'énergie est fournie au moment de l'impulsion. Si elle est de nature entretenue – frottement, souffle comme pour la flûte –, l'énergie est apportée tout au long

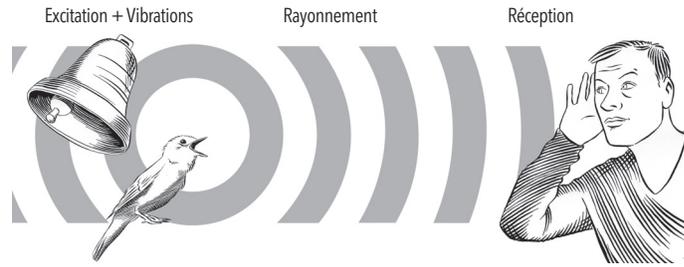


Figure 1.1 De l'excitation à la réception d'un son.

de l'excitation. Cette distinction est capitale, car elle conditionne le contenu physique du son : son évolution temporelle et son effet perceptif.

- La *vibration* peut prendre des formes diverses selon le type de corps excité : cavité aérienne, corde vibrante, plaque, caisse. Dans la réalité, le corps excité est toujours un système complexe subissant plusieurs sortes de vibrations simultanées : les modes vibratoires. Dès le premier instant de la vibration, des ondes se propagent de proche en proche, depuis le point d'excitation jusqu'à la totalité de la structure vibrante. Plusieurs sortes d'ondes (compression, cisaillement, déplacement) coexistent au sein de la structure vibrante.
- Le *rayonnement*. Aux interfaces des surfaces vibrantes (table d'harmonie) et de l'air environnant, ainsi qu'aux orifices des cavités (pavillon, trous latéraux des instruments à vent), naissent des ondes aériennes qui assurent la propagation du son depuis la structure vibrante jusqu'à un récepteur (oreille, microphone). L'air environnant est traversé d'ondes dont les amplitudes s'additionnent et qui forment un champ d'interférences complexe.
- La *réception* ou saisie du son. Le point où l'on place le microphone est toujours un point particulier du champ sonore. Dans la situation ordinaire d'un auditeur, chaque oreille capte un signal différent. Ajoutons qu'une partie des vibrations peut aussi être transmise directement par voie solidienne¹.

Une petite synthèse est proposée dans le tableau 1.

Tableau 1. Production des sons : étapes et processus

EXCITATION	VIBRATION	RAYONNEMENT	RÉCEPTION DU SON
Apport d'énergie : impulsion ou entretien.	Ébranlement d'une structure matérielle déformable et génération d'ondes dans la structure. Modes vibratoires à 1 ou 2 dimensions.	Propagation d'ondes dans le milieu environnant (gazeux, liquide, solide).	Capteurs de vibrations : oreille humaine ou capteurs mécaniques (microphones, accéléromètres).

Nous ne développerons que les aspects de la production des sons qui sont nécessaires à la compréhension de la perception sonore, et plus particulièrement ceux de la hauteur et du timbre. La présentation qui suit est donc volontairement succincte, et nous engageons le lecteur à consulter le glossaire, annexe G (pages 515 à 536) où sont développés quelques compléments et définitions utiles. Enfin, nous

1. Citons le violoniste dont le menton est en contact direct avec la caisse de l'instrument et surtout le chanteur dont les organes du larynx vibrent avec intensité, non loin de l'oreille.

utiliserons dès maintenant la représentation spectrographique des sons, nous réservant d'entrer dans le détail des différentes techniques d'analyse du son et du choix des grandeurs à représenter dans le chapitre suivant.

2.2. L'excitation : impulsion ou entretien

2.2.1. Les deux modalités de fourniture d'énergie

La première étape de la production sonore est l'apport d'énergie nécessaire pour produire une vibration. La quantité d'énergie conditionne l'amplitude du mouvement et, de façon plus ou moins directe, l'intensité sonore. La façon la plus simple de mettre un corps en mouvement est de lui donner un choc. Lorsqu'on frappe une cloche, une corde, la membrane d'un tambour, toute l'énergie est fournie dès le départ au moment de l'impulsion initiale. La vibration s'arrête lorsque l'énergie est dissipée. On dit que l'excitation est de type impulsionnelle. L'impact déforme une zone de la structure matérielle qui tend à reprendre sa position initiale : c'est l'origine de la vibration. Il faut cependant que la matière ainsi déformée soit élastique (voir Glossaire, page 518) et ne se comporte pas comme de la pâte à modeler, dont on sait qu'elle ne « sonne » pas, car la déformation s'y imprime en permanence, sans produire de réaction en retour. Les vibrations des corps solides (métal, bois, verre, corde tendue) sont sensibles au toucher et parfois même visibles. Il n'en va pas de même pour l'air, bien que ce milieu matériel peu dense soit également susceptible de vibrer. On peut exciter l'air contenu dans un tuyau ou dans une cavité en produisant une impulsion ou une variation brusque de pression (positive ou négative) à l'une des ouvertures du tube. C'est le « pop » de la bouteille qu'on débouche, le *tongue ram* du flûtiste² ou encore les bruits de clés des instruments à vent. Cependant, les vibrations aériennes dues à une seule impulsion s'arrêtent très vite. Aussi, l'excitation habituelle des instruments à vent est-elle plutôt de type « entretenu », c'est-à-dire que l'énergie nécessaire à la vibration est fournie continûment par le souffle du musicien. Les autres instruments entretenus utilisent principalement le frottement d'un archet (violon), du doigt (harmonica de verre, cristal Baschet) ou encore d'une pièce de bois (bol tibétain)³.

L'énergie dont dispose un être humain est nécessairement limitée en quantité et en durée. Étant donné que notre oreille est moins sensible aux sons graves (50 Hz) qu'aux sons aigus (3000 Hz), la plupart des sources sonores mécaniques, comme les sifflets, la voix et les instruments de musique traditionnels, se sont adaptées aux meilleures zones de réception de l'oreille. Nous verrons que ces sources nous font entendre indirectement les sons graves au travers des harmoniques élevés (voir chapitres 3 et 6). C'est aussi la raison pour laquelle il n'y a pas de relation simple entre l'énergie fournie, l'amplitude des mouvements vibratoires et l'intensité perçue, car celle-ci dépend de la fréquence des vibrations (voir chapitre 5).

En résumé, lorsque l'apport d'énergie de l'excitation à l'origine du son se produit en une seule fois (la guitare), *le son est de type impulsionnel* ; lorsque l'énergie est fournie continûment (la flûte), *le son est entretenu*. Cette distinction est capitale pour comprendre la structure acoustique des sons et leur perception.

2. Technique de jeu produite avec la langue qui obture violemment le trou d'embouchure.

3. Dans ce cas, le doigt et le bout de bois se comportent exactement comme un archet de violon.



Figure 1.2 Un verre de cristal prêt à chanter.
Cliché M. C.

2.2.2. Un exemple pratique : le verre de cristal

Pour cette expérience, il faut de préférence disposer d'un verre à pied ou d'une coupe dont le bord est fin (figure 1.2). En maintenant par sa base le verre posé sur une table, on le pince⁴ brièvement en saisissant le bord avec les ongles. Le verre « sonne » un peu à la façon d'une petite cloche. Chacun sait qu'on peut aussi le faire sonner de façon prolongée en appliquant sur le bord un doigt humide et propre que l'on fait glisser légèrement dans un mouvement circulaire continu. Pour que l'opération réussisse, il faut appuyer convenablement – ni trop, ni trop peu –, c'est-à-dire effleurer de façon sensible le verre. Dès que le verre chante, le doigt se comporte comme un archet qui « accroche » le bord et le met en vibration ; il ne faut donc pas l'étouffer en appuyant trop pesamment.

Les exemples sonores **1.1** et **1.2** donnent à entendre les sons obtenus par ces deux modes d'excitation, qui sont très différents. Sur la figure 1.3, la courbe supérieure représente la variation de l'amplitude en fonction du temps. Le son impulsif (verre percuté) a une amplitude maximale dès le début de l'excitation, puis il décroît. Le son entretenu (verre frotté) commence progressivement et persiste tant que le doigt reste en contact avec l'objet. Les variations d'intensité sont dues au déplacement du point d'excitation par rapport au microphone⁵.



Son 1.1 (5")

Verre percuté



Son 1.2 (5")

Verre frotté

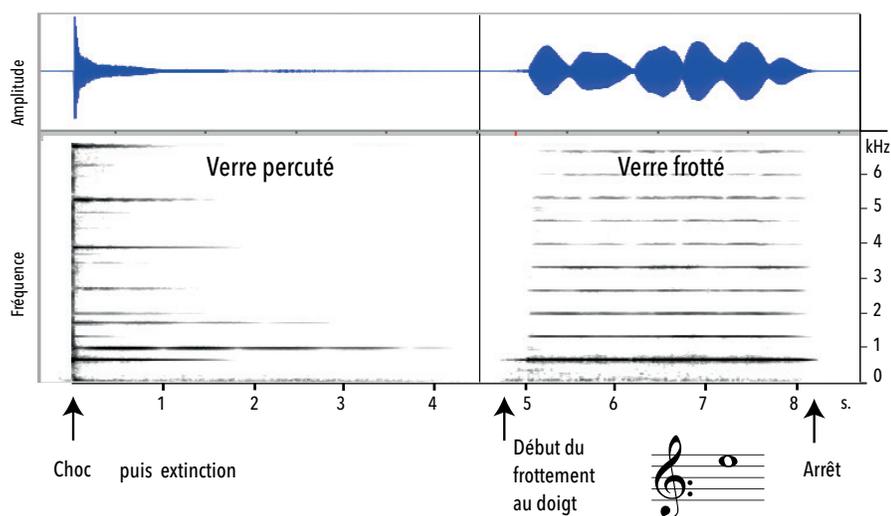


Figure 1.3 Le même corps excité de deux façons différentes : à gauche par un choc, à droite par un frottement. Analyse de l'amplitude (partie supérieure) et du contenu en fréquence (partie inférieure) des deux types de sons.

À l'écoute, le verre ne donne pas du tout la même sensation de hauteur sonore selon le type d'excitation. Sur la partie inférieure de la figure 1.3, chaque raie horizontale correspond à une fréquence émise par le verre. Le verre frotté émet une note bien définie, un mi_4 ⁶, qui apparaît sur la figure sous forme d'un réseau de raies horizontales équidistantes. Le verre percuté produit un son plus complexe à écouter. Il

4. Nous utiliserons indistinctement les termes « pincé », « percuté » ou « tinté » pour signifier que le verre est mis en vibration par un choc léger.
5. En tournant, le doigt change de position et d'orientation par rapport au microphone qui est fixe (voir Glossaire, *Rayonnement* (quadripôle)).
6. Pour les conventions d'écriture et de numérotation, voir l'annexe A.

débuté par un choc (trait vertical indiqué sur la figure), puis on entend le mi_4 mais aussi d'autres notes. Les raies horizontales sont irrégulièrement espacées et évoluent pendant l'extinction. La largeur de ces raies diminue avec le temps : dès la troisième seconde ne subsiste plus que la deuxième raie en partant du bas, celle qui fait entendre la quinte.

Ces analyses montrent que ce que nous appelons « un son » est un événement complexe, caractérisé par une courbe dont l'amplitude temporelle est typique du mode d'excitation et par un ensemble de fréquences pouvant donner, selon les cas, la sensation d'un accord complexe ou d'une note unique. Avec un même corps, ici le verre, nous avons produit deux sons très différents. En les écoutant plus attentivement, on peut toutefois y percevoir des similarités : notamment, la note musicale du verre frotté, s'entend nettement au tout début du son du verre percuté.

2.2.3. Autre exemple : la lame de vibraphone et la corde de harpe

On peut appliquer ces deux modes d'excitations, choc ou frottement, à des corps quelconques. Voici deux autres exemples produits, l'un avec une lame de vibraphone (fa_2), l'autre avec une corde de harpe (mi_2).

Bien que l'entretien de la lame de vibraphone par un archet soit très court (300 ms), on retrouve à l'écoute la même opposition de sonorité entre le son percuté, assez complexe, et le son frotté faisant entendre clairement une note (Son 1.3). En revanche, la corde de harpe pincée ou frottée donne deux sons similaires à l'écoute (Son 1.4), qui ne diffèrent que par leur allure temporelle, décroissante ou entretenue (figure 1.4).



Son 1.3 (7")

Vibraphone :
percuté puis
frotté



Son 1.4 (7")

Corde
de harpe :
pincée puis
frottée

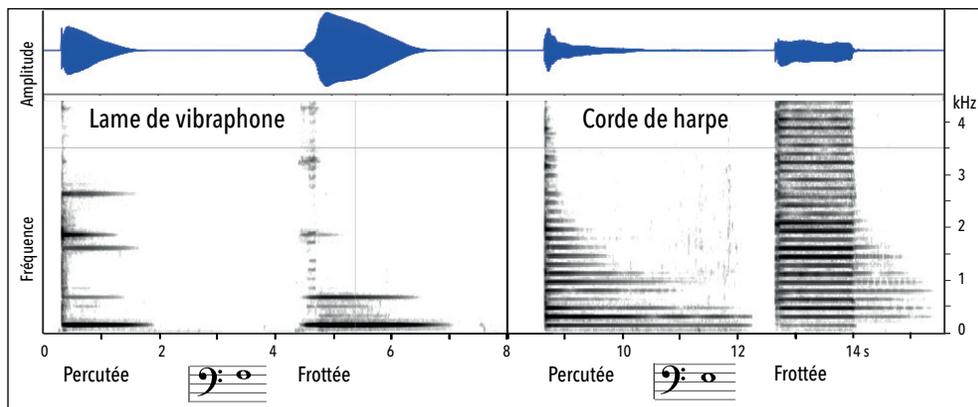


Figure 1.4 Excitation par impulsion ou par frottement appliquée à une lame de vibraphone et à une corde de harpe. Partie supérieure : amplitude/temps. Partie inférieure : spectrogramme temporel.

Les différences constatées entre les sons du verre, de la lame ou de la corde, selon que ces objets sont percutés ou frottés, proviennent principalement de la structure géométrique mise en vibration. Le verre et la lame de vibraphone sont des structures volumineuses dont on doit étudier les déformations dans les trois dimensions de l'espace, alors qu'on peut considérer qu'une corde tendue est déjà bien représentée par sa seule longueur. Nous abordons maintenant la deuxième étape : celle de la vibration des corps matériels.

2.3. La notion d'onde

2.3.1. La propagation des ondes

Il est habituel d'introduire la notion d'onde en prenant pour exemple une étendue d'eau calme à la surface de laquelle on lance un objet (figure 1.5). Cette expérience commune à tous les pêcheurs à la ligne a le grand mérite d'offrir une visualisation claire d'un phénomène oscillant et de sa propagation sous forme d'ondes circulaires. Les cercles grandissants rendent visible la propagation du mouvement sans déplacement de matière : si l'on dispose d'un objet flottant placé non loin du point d'impact, on constate qu'il oscille au passage des cercles tout en restant à la même distance de celui-ci.

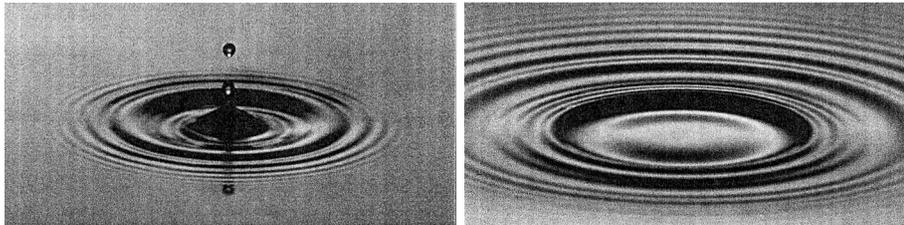


Figure 1.5 Ondes concentriques dues à la propagation d'une oscillation localisée au point d'impact.

DR.

L'expérience que nous venons de décrire met en jeu deux ordres de phénomènes étroitement liés : d'une part un mouvement oscillant localisé, d'autre part la propagation de ce mouvement sous forme d'une onde qui s'étend, de proche en proche, à une zone de plus en plus grande. Au cours de la propagation, l'amplitude des oscillations décroît en fonction de l'éloignement au point d'impact et une partie de l'énergie se dissipe au cours de la transmission. Le mouvement s'amortit et, finalement, il s'arrête lorsque l'énergie totale a été consommée.

La vitesse de propagation (ou célérité) des ondes dépend des caractéristiques mécaniques du milieu. Elle est d'environ 340 m/s dans l'air à 15 °C, ce qui est beaucoup plus faible que pour la lumière. Lors d'un orage, le décalage entre la célérité de l'onde lumineuse de l'éclair (300 000 km/s), quasi instantanée pour nous, et le bruit du tonnerre survenant, par exemple, 3 s plus tard, permet d'apprécier la distance de l'orage : environ 1 km dans notre exemple.

2.3.2. Les ondes dans les instruments de musique : exemple du cor des Alpes

Par opposition à une grande étendue d'eau, les parties vibrantes des instruments de musique sont de petites dimensions. Lorsqu'on met en vibration la membrane d'une timbale, une corde de guitare ou l'air contenu dans un tuyau, les oscillations nées au point d'excitation se propagent jusqu'aux bords de la caisse (ou aux extrémités de la corde ou du tuyau) qu'elles atteignent avec une amplitude encore notable. Là, elles se réfléchissent, repartent en sens inverse, et croisent les ondes incidentes en produisant un « champ d'interférences » (voir Glossaire, page 521).

Le cor des Alpes est constitué d'un tuyau conique d'environ 4 m de long (figure 1.6). Plaçons un microphone près du pavillon et, avec la paume de la main, produisons sur l'embouchure une petite surpression qui progresse le long du tuyau jusqu'au pavillon (Son 1.5). Arrivée au pavillon, une petite partie de la perturbation continue sa progression dans le milieu extérieur et atteint le microphone, l'autre partie se réfléchit et revient vers l'embouchure d'où elle repart pour un nouveau voyage vers le pavillon. Entre deux rencontres avec le microphone, la perturbation parcourt donc le double de la longueur du tuyau, soit environ 8 m.



Figure 1.6 Joueur de cor des Alpes.

Source de l'image : disque Odéon *Ländlerkapelle Balmerbuebe Wilderswil*. MSOE 4054 (1959)



Son 1.5 (2nd)

« Pop » :
impulsion sur
l'embouchure
du tuyau

La figure 1.7 montre l'analyse du signal d'amplitude recueilli par le microphone. On voit que l'impulsion initiale effectue plusieurs allers-retours dans le tuyau, avec une amplitude décroissante, avant de s'amortir totalement. Quelle est la durée séparant deux arrivées ? En sélectionnant l'intervalle entre deux impulsions successives, le logiciel d'analyse⁷ affiche 0,021s (zone bleue). Cette valeur est proche de celle que l'on peut estimer en calculant la durée de propagation dans le tuyau : longueur du tuyau (m)/célérité du son (m/s), soit $8/340 = 0,023$ s. Ce n'est qu'un ordre de grandeur, car ni la longueur effective du tuyau ni la célérité du son ne sont connues précisément.

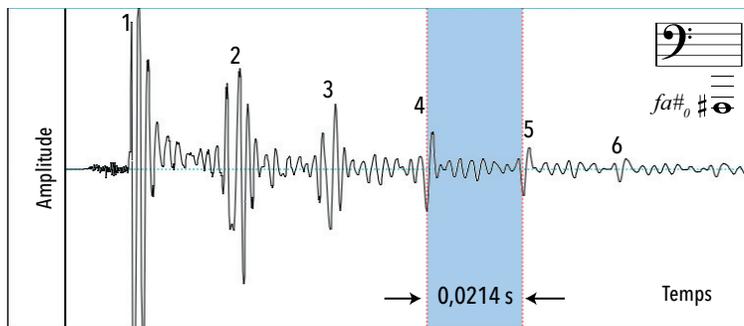


Figure 1.7 Variation de l'amplitude en fonction du temps. Succession des impulsions se propageant dans le tuyau avec une amplitude décroissante, recueillies au pavillon d'un cor des Alpes.

À l'intérieur du tuyau (tube conique de longueur finie), les ondes aériennes restent en partie prisonnières en effectuant des mouvements réguliers d'aller-retour entre les deux extrémités. La petite proportion qui sort du tuyau (entre 5 et 10 % de l'énergie totale, ce qui est très faible) constitue le son rayonné. Le microphone recueille un train d'impulsions régulièrement espacées de 0,0214 s. La fréquence du son est inverse de la durée séparant deux impulsions, soit : $1/0,0214 \text{ s} = 46,72 \text{ Hz}$. C'est un son grave, voisin d'un $fa\#_0$, difficile à apprécier par l'oreille, car sa durée est brève : l'énergie de l'impulsion initiale se dissipe rapidement au cours de la propagation. Entretenir le son, c'est apporter de l'énergie de façon synchrone à la fréquence du système. Les phénomènes réels sont extrêmement compliqués. Il nous suffira de dire ici que si nous produisons de nouvelles impulsions « en phase »

avec les ondes de retour, de sorte que leurs amplitudes s'additionnent à chaque cycle, le système accumule de l'énergie. Au bout d'un certain nombre d'allers-retours, s'établit une configuration spatiale appelée « déformée modale ». En certains points, l'air reste immobile – ce sont les « nœuds de vibrations » – alors que d'autres vibrent avec une grande amplitude – ce sont les « ventres de vibration ». L'instrument fonctionne alors en régime entretenu et le tuyau est le siège « d'ondes stationnaires ».

2.4. Les modes vibratoires (transition ondes-modes)

2.4.1. Les fréquences propres

Une déformée modale, comme celle que nous venons de décrire, ne s'établit que pour une fréquence de vibration particulière qui est appelée « fréquence propre ». Déformée modale ou fréquence propre sont deux façons – l'une spatiale, l'autre temporelle – de caractériser cet état particulier d'un système vibrant dans lequel les ondes sont stationnaires. L'ensemble constitue un « mode propre », lequel dépend des caractéristiques géométriques du système et de la vitesse de propagation des ondes dans le milieu⁸.

2.4.2. Les modes propres et la géométrie des corps vibrants

La notion de mode propre est fondamentale en acoustique puisqu'elle gouverne tous les systèmes vibrants, y compris les lieux d'écoute. En acoustique musicale, l'ajustement des modes propres guide la conception et la réalisation de la plupart des instruments, qu'il s'agisse des fréquences de jeu (instruments à vents, barres et cordes vibrantes) ou de l'amplitude des composantes spectrales qui contribuent à la qualité du timbre (principalement la caisse des instruments à cordes).

Les modes propres correspondent aux déformations qu'adopte un corps qu'on excite et dépendent donc en premier lieu de la forme géométrique de celui-ci. L'étude théorique distingue trois catégories :

- les corps dont les déformations se produisent principalement le long d'une seule dimension (1D) : les cordes, les tuyaux ;
- ceux dont les déformations affectent les deux dimensions d'une surface (2D) : les membranes, les tables d'harmonie ;
- ceux dont les déformations affectent un volume, une « coque » : les cloches, les caisses de résonance.

Le deuxième paramètre à prendre en compte pour chaque type de corps concerne la façon dont il est construit, en particulier les points de fixation ou d'encastrement (qui sont des zones de déplacement quasi nul, donc des nœuds de vibration), ainsi que les caractéristiques du matériau, notamment son homogénéité. À titre d'exemple, une barre d'aluminium (vibraphone), dont les caractéristiques mécaniques sont les mêmes dans toutes les directions, se comportera différemment d'une barre de bois (marimba), matériau inhomogène, qui ne possède pas les mêmes caractéristiques de propagation des vibrations dans le sens des fibres ou dans le sens perpendiculaire aux fibres.

Quelques représentations animées aident à comprendre les modes vibratoires (voir Annexe E et Glossaire). Celles des structures longilignes comme la corde ou le tuyau – dont on néglige le diamètre – sont les plus faciles à comprendre. Connaissant la longueur, les conditions aux extrémités et la vitesse de propagation des ondes dans une corde ou dans l'air du tuyau, on peut définir les modes propres et calculer les fréquences propres du système. Le problème est plus compliqué pour

8. Cette présentation est volontairement simplifiée. Pour un développement de ces notions voir Chaigne & Kergomard, 2008, chapitre 3, p. 98-100.

les structures 2D. Nœuds et ventres de vibration ne sont plus situés sur un seul axe. La surface vibrante se divise en zones ventrales séparées par des lignes nodales. Pour une même forme, plusieurs familles de modes peuvent se produire. Les structures volumiques nécessitent de considérer les modes s'établissant dans les différents plans de coupe. Enfin, dans les trois catégories de systèmes peuvent se produire des modes vibratoires dus à différentes sortes d'ondes : ondes transversales, ondes longitudinales (ou de compression), ondes de torsion. Il faut toutefois insister sur le fait qu'au moment de l'excitation, *tous* les modes vibratoires coexistent tant bien que mal. Nous ne développerons pas plus et nous engageons les lecteurs curieux à se reporter aux ouvrages cités en bibliographie. Pour une première approche en acoustique, le lecteur pourra consulter : Leipp, 2011 ; Pierce, 1984 ; Rossing, 2002 ; Winckel, 1960, et plusieurs chapitres du *Livre des techniques du son* édité par Mercier (Liénard, Castellengo, Vivié et Cassan). Les traités de Bruneau, Chaigne et Kergomard, Fletcher, ainsi que la collection des ouvrages de Bouasse s'adressent aux lecteurs déjà avertis.

2.4.3. La matérialisation des modes vibratoires des plaques : figures de Chladni

Nous avons dit que tous les corps possédaient des modes propres. Ceux des cordes furent explorés et théorisés très tôt, grâce à la pratique du monocorde, et servirent de modèle à la théorie des tuyaux sonores (voir chapitre 8, § 1.2.3). Les rapports de fréquences remarquables entre les modes successifs trouvèrent leur application dans la théorie musicale, en particulier chez Joseph Sauveur qui développa la théorie des harmoniques du Plein Jeu d'orgue (Sauveur, 1702). Les modes de vibration des plaques ne furent explorés qu'au début du XIX^e siècle par un physicien expérimentateur, Ernst Chladni, inventeur du clavicylindre⁹. Chladni eut l'idée de répandre un peu de sable à la surface d'une plaque métallique fixée en son centre et de la faire vibrer au moyen d'un archet¹⁰. L'expérience, assez aisée à reproduire avec du sel fin, permet de produire des figures géométriques spectaculaires (figure 1.8).

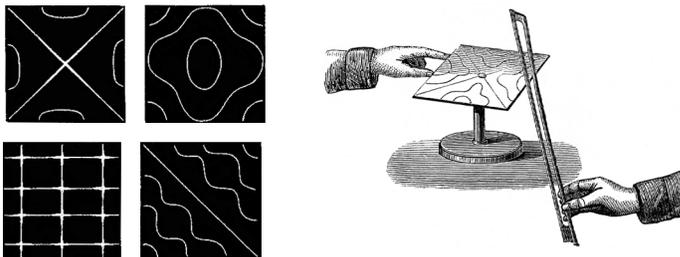


Figure 1.8 Figures de Chladni : matérialisation de la forme vibratoire d'une plaque rectangulaire à une fréquence donnée. À droite, remarquez la pose des doigts sur la plaque pour imposer l'emplacement des nœuds.

Source : Tyndall, J., 1869, *Le son* (traduction française de l'abbé Moigno). Paris : Gauthier-Villars, figures 60 et 61.

Lorsque l'archet accroche un mode, on entend un son de fréquence stable et le sel se rassemble selon les lignes nodales du système. Pour contraindre la plaque à vibrer sur un mode particulier, il faut poser légèrement les doigts sur le bord, à l'endroit de futures lignes nodales et exciter avec l'archet à l'endroit d'une zone ventrale (voir figure 1.8, à droite).

9. Instrument à tiges de verre qu'il présenta à l'Académie des sciences de Paris en 1808.

10. Dans la préface de son traité d'acoustique, publié en français en 1809, Chladni précise que cette idée lui est venue après avoir vu les figures « électriques » que Lichtenberg avait publiées avant lui en 1777. Voir aussi N. Witkowski, 2001, *Une histoire sentimentale des sciences*, Le Seuil, Paris, p. 135-139.

2.4.4. Les modes propres et les « harmoniques » effleurés

Les instrumentistes ont une connaissance empirique des différents modes propres et de leur sélection. Dans le jeu ordinaire, les violonistes utilisent normalement le premier mode vibratoire de la corde vibrante, mais quelquefois ils jouent des « harmoniques effleurés ». Tout en tirant l'archet, ils posent légèrement le doigt sur la corde, ce qui a pour effet de gêner la formation d'un ventre de vibration ou, ce qui revient au même, d'imposer un nœud de vibration à cet endroit. Les points favorables aux harmoniques effleurés, connus depuis longtemps, sont le milieu, le tiers, le quart de la corde, etc., c'est-à-dire les endroits susceptibles de provoquer la subdivision de la corde en un nombre entier de parties (voir figure 1.9).

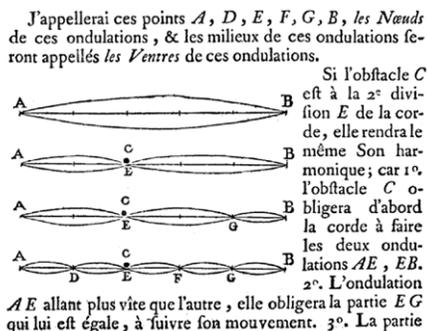


Figure 1.9 Démonstration expérimentale des modes vibratoires d'une corde vibrante.

Sauveur, J., 1701, *Mémoires de l'Académie des Sciences*, p. 352.

De façon analogue, le débouchage d'un trou au milieu du tuyau d'une flûte fait passer au deuxième mode vibratoire, voisin de l'octave du premier. Il existe même des instruments dont les fréquences de jeu sont exclusivement celles des modes propres (voir § 5.2.2, page 25). Précisons dès maintenant que l'emploi du mot « harmonique » dans le contexte musical a un sens très différent de celui que nous lui donnons en acoustique (voir page 24).

2.4.5. Un exemple pratique : les modes vibratoires du diapason à fourche

Le diapason à fourche est un instrument construit pour produire une fréquence étalon, le plus souvent un la_3 dont la fréquence de référence est 440 Hz. Encore faut-il apprendre à « en jouer ».

Lorsqu'on frappe le diapason, on entend d'abord un choc métallique suivi d'un son très bref et très aigu (Son 1.6). Ce son, que nous appellerons « partiel 2 », correspond à la fréquence propre du mode 2 du diapason (figure 1.10). Il s'amortit très rapidement¹¹. La fréquence d'accord du la_3 est celle du partiel 1 correspondant au mode 1 du diapason. En pratique, le partiel 2, dont la fréquence est ici environ 2800 Hz, est ignoré perceptivement (figure 1.11).

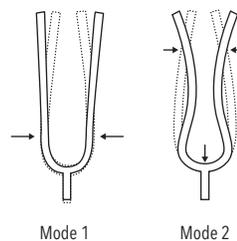


Figure 1.10 Modes vibratoires d'un diapason à fourche.



Son 1.6 (5'')

Diapason à fourche

11. Le diapason se comporte comme une verge encastrée dont la fréquence du deuxième mode vibratoire est environ six fois celle du premier.

Le rayonnement acoustique du diapason tenu par sa tige est très faible : on doit l'approcher de l'oreille pour l'entendre. Or, si l'on met la tige en contact avec une table d'harmonie, les ondes de compression provoquées par les vibrations des branches se transmettent par voie solide à toute la surface. Celle-ci vibre en produisant des ondes aériennes de plus grande amplitude.

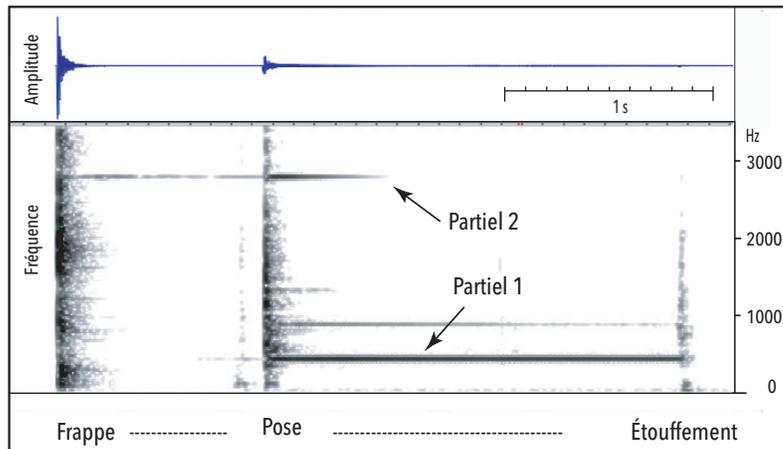


Figure 1.11 Analyse acoustique du son produit. Le mode 1 donne la fréquence d'accord (Partiel 1 sur l'analyse). Le mode 2 produit un son aigu que l'on entend au moment du choc et qui s'évanouit rapidement (Partiel 2 sur l'analyse).

La *vibration* peut prendre des formes diverses selon le type de corps excité. Dans la réalité instrumentale, le corps excité est toujours une structure complexe subissant plusieurs sortes de vibrations simultanées : **les modes vibratoires**.

2.5. Des vibrations de la structure au son rayonné

Lorsque nous entendons le son d'une guitare ou d'une flûte, situés à une certaine distance de nous, cela signifie que les vibrations que produisent ces instruments ont ébranlé l'air environnant qui les a transmises jusqu'à nos oreilles. L'exemple de la flûte est intuitif puisque son fonctionnement a pour fondement des modes vibratoires aériens. Chaque orifice (embouchure, pavillon, trou latéral) se comporte comme une source vibratoire. Pourtant, les ondes rayonnées par les orifices ne sont dues qu'à des « pertes » du système évaluées à environ 5 % de l'énergie totale, laquelle reste confinée dans le tube où elle contribue à l'entretien de la vibration.

Le problème se pose différemment avec les instruments à cordes. Une corde qui vibre ne déplace qu'un très faible volume d'air autour d'elle. Tendue sur une structure rigide et inerte, une corde vibrante est quasiment inaudible. Les cordes sont donc toujours couplées à des surfaces (bois, peau) qu'elles déforment en vibrant et qui, à leur tour, génèrent des ondes de compression aériennes. Étant donné que les vibrations des différentes parties de la caisse, et plus particulièrement celles de la table, jouent un rôle majeur dans le rayonnement du son, il y a donc lieu de prendre en compte pour ces instruments non seulement les modes propres des cordes mais aussi ceux des plaques auxquelles elles sont fixées. Nous avons vu dans

l'expérience précédente du diapason que celui-ci n'est audible à distance que couplé à une surface vibrante. Pour un corps donné, le rayonnement varie selon le mode vibratoire. En conséquence, le rayonnement se modifie continuellement selon les fréquences jouées.

Le son entendu à une certaine distance d'un instrument dépend du mode de propagation des ondes. En champ libre, par exemple en plein air, la propagation des ondes est sphérique (voir Glossaire, page 528). L'amplitude du front d'onde décroît en raison inverse du carré de la distance. S'y ajoutent les pertes dues à la transmission et l'absorption due à l'air, variable avec l'humidité. Dans un lieu clos, les ondes aériennes se réfléchissent sur les parois (murs, plafond, sol) et, si l'absorption est faible, il se forme rapidement un champ d'interférences plus ou moins homogène. Rappelons que la longueur d'onde λ est la distance entre deux points successifs dont les mouvements sont en phase. Dans un milieu donné, la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la fréquence : elle diminue lorsque la fréquence croît. Par exemple, dans l'air à 15 °C, $\lambda = 3,40$ m pour un son de 100 Hz et $\lambda = 34$ cm pour un son de 1000 Hz. Comme le comportement des ondes (réflexion, diffraction) dépend des rapports entre λ et les dimensions des obstacles, la connaissance de ces ordres de grandeur permet d'estimer l'incidence que peuvent avoir certains obstacles sur le trajet des ondes sonores (voir Glossaire, page 523 et page 528). La tête d'un auditeur assis devant moi, d'un diamètre de l'ordre de 20 cm, n'est pas un obstacle pour les sons de fréquence basse, mais elle commence à faire écran pour les fréquences supérieures à 1700 Hz.

Le « son » d'un instrument, tel que nous nous le représentons en mémoire, est un concept abstrait. Dès qu'on veut faire une analyse, il faut garder à l'esprit le fait que le signal enregistré par un microphone est représentatif d'une position particulière de l'espace sonore. Il change d'un point à un autre.

2.6. La réception, la saisie du son, les transformations de la vibration

Ondes aériennes. Dans la situation ordinaire, nos oreilles captent les variations de la pression aérienne rayonnées directement par les vibrations des objets excités.

Capteurs (autres que l'oreille). Tout mouvement vibratoire peut être converti en signal électrique : il suffit de disposer du capteur approprié. Avec un accéléromètre, un capteur électromagnétique, un électroglottographe (voir chapitre 9, § 1.2.3) on peut capter directement le mouvement d'une structure vibrante, puis l'amplifier et le convertir en ondes aériennes. La guitare électrique, par exemple, est un instrument dans lequel le son rayonné directement par la structure (le son « acoustique ») ne joue qu'un faible rôle dans le résultat final. Le « son » que rayonne la guitare électrique s'élabore tout au long d'une chaîne dans laquelle interviennent des filtres, des modulateurs, des mises en forme dynamiques et, aujourd'hui, des interactions en temps réel avec des traitements informatiques. Même si l'origine en est le mouvement d'une corde pincée – capté par un système électromagnétique – et que parfois les vibrations solidiennes du corps de l'instrument et du manche y participent, le signal sonore résultant peut n'avoir aucune des caractéristiques acoustiques de la famille guitare. Quand au rayonnement dans l'espace, il est le résultat du mixage et de l'affectation d'une ou de plusieurs voies à un système d'enceintes. « L'écoute en est déportée et focalisée sur un autre objet que l'instrument lui-même »¹². Le plus souvent maintenant, nous écoutons des sons préalablement enregistrés, reproduits par voie électroacoustique. Le signal sonore

12. Lähdeoja, O., Navarret, B., Quintans, S., & Sèdes, A., 2013, « La guitare électrique comme instrument augmenté et outil de création musicale », in *La musique et ses instruments*, Paris : Delatour, p. 317).

ainsi diffusé dans l'espace est assez différent de celui qu'une source mécanique rayonne par voie aérienne.

2.7. Définitions utiles

Soit un mouvement vibratoire constitué d'un aller-retour simple et régulier dans le temps : ce mouvement périodique est dit « sinusoïdal ».

La *fréquence* vibratoire (f) est le nombre d'oscillations qu'effectue le système (corde, anche) pendant une seconde. L'unité de fréquence est le hertz (Hz). La durée d'une seule oscillation porte un nom spécifique : c'est la *période* (T) du mouvement. En acoustique, les périodes, mesurées en secondes, sont souvent affichées en millisecondes (ms) par commodité.

La *période* (T) est l'inverse de la fréquence (f), soit $T \text{ (s)} = 1/f \text{ (Hz)}$.

L'*amplitude* du mouvement vibratoire correspond au déplacement maximal de la portion excitée par rapport à sa position de repos. L'amplitude est liée à l'énergie injectée au moment de l'excitation.

L'*onde* décrit la propagation du mouvement vibratoire depuis le point d'impact jusqu'à l'ensemble de la structure. Elle possède une *célérité* c (m.s^{-1}) (vitesse de propagation) et une *longueur d'onde* λ (m) (périodicité spatiale) qui dépend de la fréquence et des caractéristiques du milieu de propagation selon la relation : $\lambda \text{ (m)} = c \text{ (m.s}^{-1}\text{)}/f \text{ (Hz)}$

Voir Glossaire, pages 516 et 523.

Les oscillations sont *libres* (excitation par impulsion) ou *entretenues, périodiques* (excitation par entretien). Voir Glossaire page 526.

3. La forme temporelle des vibrations

3.1. L'inscription des vibrations

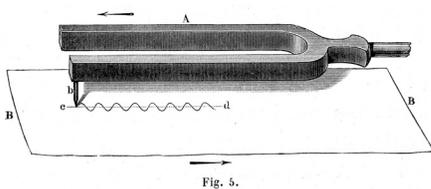


Figure 1.12 Inscription de la forme vibratoire d'une branche de diapason.

Helmholtz, H., 1874, *Théorie physiologique de la musique*, p. 27.

Dès les premières observations, les liens entre l'amplitude des vibrations et l'intensité sonore, entre la rapidité des vibrations et la hauteur des sons ont été établis. En revanche, l'étude de la forme des vibrations en un point donné, c'est-à-dire des relations entre la forme des vibrations et la qualité du timbre n'a préoccupé les scientifiques que plus tardivement, d'autant que l'observation des mouvements à l'œil nu était difficile

en raison de la rapidité des vibrations et de leur faible amplitude. Il était commun d'imputer au matériau les différences de timbre¹³. « L'écriture » du mouvement de la branche d'un diapason (figure 1.12) est une opération difficile à réaliser. Si l'on veut, par exemple, étudier la période d'un diapason de 100 Hz ($T = 10 \text{ ms}$), il faut, pour obtenir 1 cm de tracé, que le papier défile à 1 m/s avec une très grande régularité. Les nombreuses tentatives réalisées au milieu du XIX^e siècle aboutiront à la

13. « Le différent timbre du son (sic) et ses articulations sont au nombre des objets les plus remarquables de l'ouïe. Elles ne paraissent pas dépendre des manières de vibrations, ni (ou très peu) de la forme du corps sonore, mais plutôt (§ 31) de la matière du corps sonore et de celle du corps par lequel il est frotté ou frappé, comme aussi de la matière qui propage le son. » Chladni, 1809, § 240.

conception d'appareils à « écrire le son », comme le phonautographe de Scott de Martinville (1857), et finalement à la gravure du son dans de la cire (Edison, 1877)¹⁴.

3.2. La composition des vibrations

À l'époque où Helmholtz entreprend ses recherches, les inscripteurs à stylet sont très imparfaits¹⁵. Sur la base de la loi mathématique de Fourier (voir Glossaire, page 519), il démontre objectivement la présence d'harmoniques dans un son complexe périodique à l'aide de résonateurs. Helmholtz établit ainsi la première théorie acoustique de ce qu'il appelle le « timbre musical » qui ne concerne que la partie stable des sons instrumentaux entretenus. Il démontre aussi que la phase (voir Glossaire) relative des harmoniques n'a pas d'incidence sur la perception du timbre.

3.3. Du mouvement à l'onde sonore

Avec les progrès techniques (amplification électrique et oscillographe cathodique, électronique, numérisation), la captation et l'inscription des mouvements vibratoires permettent de reproduire avec fidélité les moindres détails de l'onde sonore.

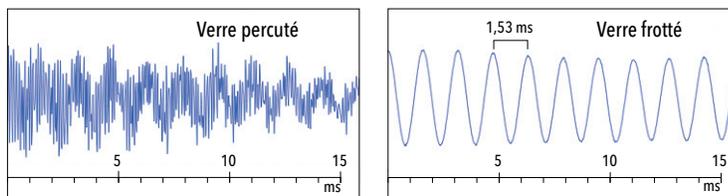


Figure 1.13 Variation d'amplitude en fonction du temps pour deux types d'excitation d'un verre. À gauche, *percussion*. Tous les modes propres sont excités simultanément. Le signal temporel est complexe. À droite, *frottement*. Le verre vibre à la fréquence du mode entretenu. Le signal temporel est régulier, périodique et l'on peut mesurer la période du mouvement indiquée sur la figure (ici 1,53 ms). Les signaux représentés sont captés 100 ms après le début de l'excitation.

On voit sur le tracé de l'amplitude de la figure 1.13 l'opposition entre l'onde périodique du signal émis par un verre frotté (à droite) et l'onde complexe, irrégulière du signal émis par le verre percuté (à gauche). Cette dernière est animée de petites oscillations correspondant aux fréquences des différents modes propres, non synchronisés. À l'aide du filtrage, nous proposons d'écouter les différentes composantes qui constituent chacun des deux sons émis par le verre (Sons **1.7** et **1.8**).

14. Voir Paul Charbon, 1981.

15. Helmholtz observe à l'œil nu les mouvements des corps vibrants (corde, diapason) à l'aide de points lumineux et d'un « microscope à vibration » (p. 113 de l'édition française, 1874).

4. L'analyse auditive des composantes d'un son : la série harmonique

4.1. L'analyse auditive par filtrage

Plusieurs techniques permettent d'isoler les composantes d'un son complexe. Celle qui est utilisée dans les exemples qui suivent a été réalisée avec un matériel analogique. Le son enregistré sur une boucle magnétique se répète indéfiniment. Il passe au travers d'un filtre à bande étroite dont la fréquence centrale est variable, ce qui permet de sélectionner les composantes les unes après les autres. La composante sélectionnée est amplifiée sans pour autant que les autres soient totalement éliminées. Cet effet, dû aux limites de performance des filtres analogiques offre un avantage auditif certain : le son global reste perceptible. Les techniques d'analyse-synthèse numériques permettent aujourd'hui d'obtenir un filtrage total.

4.2. Le verre percuté et le verre frotté

La « dissection » sonore que permet le filtrage nous fait pénétrer au cœur des agrégats les plus complexes. Dans le son du verre percuté (Son 1.7), les fréquences émises individuellement par chacun des modes propres, qui ont des évolutions temporelles indépendantes, sont déjà perceptibles dans le son global. En particulier, nous pouvons prêter attention aux différentes *notes* qui émergent alors que d'autres s'éteignent. Après l'écoute des composantes isolées, le son global se laisse plus facilement analyser (voir figure 1.14).

Il en va tout autrement de l'écoute du son entretenu (Son 1.8). Le son global se présente comme un tout relativement simple à percevoir : *une seule note*, mais pourvue d'une sonorité particulière. La première composante isolée ne diffère du son global que par sa sonorité douce et mystérieuse : c'est un *son pur*. La suite du filtrage révèle une succession de sons de hauteurs diverses – les harmoniques – pratiquement inaudibles dans le son global, à l'exception de l'harmonique 5 qui se distingue par son intensité.



Son 1.7 (31")

Filtrage : verre percuté



Son 1.8 (31")

Filtrage : verre frotté

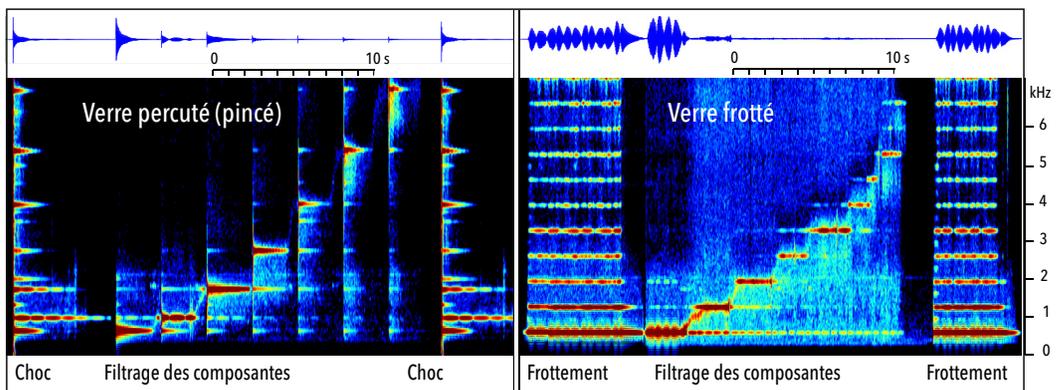


Figure 1.14 Cette figure illustre l'écoute des analyses par filtrage du Son 1.7 (verre excité par percussion) et du Son 1.8 (verre excité par frottement). Pour chaque exemple, on entend et on voit le son global, puis l'analyse par mise en résonance des composantes sélectionnées successivement du grave à l'aigu, et le son global qui réapparaît à la fin de la séquence. La courbe supérieure rend compte de la variation d'amplitude en fonction du temps.

Voici les cinq premiers sons de chaque suite (notes musicales approchées) :

Verre percuté (1) mi_4 (2) si_4 (3) la_5 (4) fa_6 (5) si_6

Verre frotté (1) mi_4 (2) mi_5 (3) si_5 (4) mi_6 (5) $sol\#_6$

Seul le premier son est commun aux deux séries : c'est la fréquence du mode 1.

Chaque composante émise par le verre percuté correspond à la fréquence d'un des modes propres de vibration du verre : cette suite est spécifique d'un verre donné. Au contraire, la suite des composantes du verre frotté est celle que l'on va retrouver pour tous les sons entretenus : c'est la *série harmonique*.

4.3. La série harmonique

La chorde frappée, & sonnée à vuide fait du moins cinq sons différens en mesme temps, dont le premier est le son naturel de la chorde, qui sert de fondement aux autres ... Or il faut choisir un grand silence pour les appercevoir, encore qu'il ne soit plus necessaire quand on y a l'oreille accoustumée ... & j'ay rencontré plusieurs Musiciens qui les entendent aussi bien que moy ... Or ces sons suivent la raison de ces nombres 1, 2, 3, 4, 5, car l'on entend quatre sons differens du naturel, dont le premier est à l'Octave en haut, le second à la Douzième, le 3 à la Quinzième, & le 4 à la Dix-Septiesme majeure ...

Marin Mersenne, 1636, Livre quatrième des instruments, Proposition IX.

Quelques auteurs comme Mersenne et Descartes¹⁶ avaient déjà remarqué, dès le XVII^e siècle, que dans certaines conditions de silence, et particulièrement pour les sons graves (tuyau d'orgue, viole de gambe), il était possible d'entendre, en plus de la note fondamentale, des sons à la quinte redoublée (douzième) ou à la tierce majeure (dix-septième). Ce phénomène intrigant est resté sans explication jusqu'au XIX^e siècle. C'est Joseph Fourier qui a montré (*Théorie analytique de la chaleur*, 1822) que l'on pouvait décomposer un mouvement périodique complexe en une somme de mouvements périodiques élémentaires dont les fréquences sont des multiples exacts de la composante la plus grave, appelée fondamentale. Ainsi les fréquences des cinq premiers harmoniques (H) d'un la_3 de 440 Hz seront : $H_1 = 440$ Hz ; $H_2 = 2 \times 440 = 880$ Hz ; $H_3 = 3 \times 440 = 1\ 320$ Hz ; $H_4 = 4 \times 440 = 1\ 760$ Hz ; $H_5 = 5 \times 440 = 2\ 200$ Hz, et ainsi de suite. La succession des harmoniques d'un son périodique est invariable, c'est la même pour tous les sons périodiques.

Voici quelques exemples d'analyse de sons instrumentaux : Son **1.9** (harmonica, $ré_2$) ; Son **1.10** (trombone, sol_1) et Son **1.11** (basson, sib_1). Plusieurs techniques vocales, telles le chant « diphonique » utilisent la sélection des harmoniques pour produire une mélodie. Écoutez l'analyse du Son **1.12**. Pour plus d'explications, voir page 26.

4.4. Les intervalles de la série harmonique

Par définition, l'intervalle entre deux sons A et B est déterminé par le rapport entre leurs fréquences, soit $f(B)/f(A)$ (ou inversement). Étant donné que les harmoniques d'un son de fréquence f ont pour fréquences $2f, 3f, 4f$ etc., les intervalles entre deux sons successifs ont des rapports de fréquence qui sont : 2, 3/2, 4/3, 5/4, et ainsi de suite. Du point de vue musical, la mélodie formée par la suite des harmoniques est invariable et fournit toujours la succession des intervalles suivants : *octave, quinte, quarte, tierce majeure, tierce mineure, petite tierce mineure, ton majeur*, etc.



Son 1.9 (1'45)

Harmonica
(voir page 31)



Son 1.10 (1'27)

Trombone



Son 1.11 (1'45)

Basson



Son 1.12 (17'")

Voix diphonique
(voir page 31)

16. *Compendium musicae ou Abrégé de musique* (manuscrit 1618). Voir aussi Baskévitch, 2008.

Lorsqu'on connaît cette suite, il est facile d'associer aux intervalles les rapports numériques qui les caractérisent.

Prenons l'exemple d'un son dont la hauteur fondamentale est mi_1 (figure 1.15).

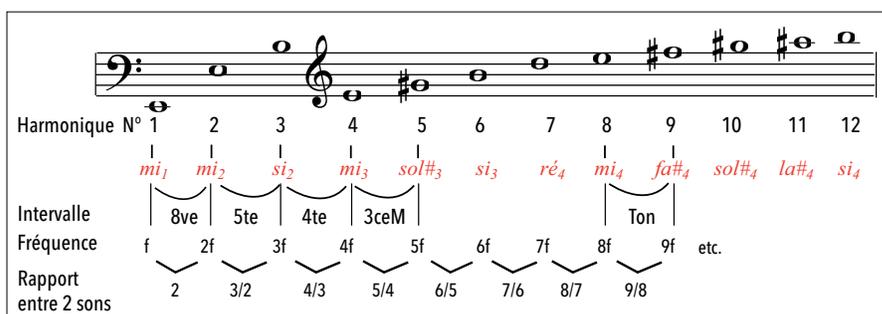


Figure 1.15 Harmoniques du mi_1 . Notation musicale, nom des notes et indice d'octave. Intervalles et rapports numériques entre deux sons successifs.

La suite des huit premiers harmoniques correspond aux notes mi_1 , mi_2 , si_2 , mi_3 , $sol\#_3$, si_3 , $ré_4$, mi_4 .

- Remarque 1 : l'octave est un intervalle particulier de rapport 2. Les harmoniques n° 2, 4, 8, 16 sont donc tous à intervalles d'octave du premier. Pour la même raison, les sons harmoniques de numéros pairs sont toujours la réplique à l'octave supérieure d'un harmonique déjà apparu : par exemple, H3 et H6 ou H5 et H10. Finalement, seuls les harmoniques de rang impair introduisent un son nouveau dans la série.
- Remarque 2 : la notation musicale des harmoniques est très pratique. Il est utile de la connaître par cœur, au moins jusqu'à l'harmonique 12. Mais il faut garder à l'esprit que les notes écrites sur une portée (voir figure 1.15) sont des approximations. Il est courant d'entendre dire, à l'audition d'une suite d'harmoniques : « la tierce majeure (H 5) est trop basse ». L'harmonique 5 n'est ni juste ni faux, il est très exactement à la fréquence quintuple du fondamental. Il forme avec l'harmonique 4 un intervalle de tierce majeure *pure* ou *naturelle*, dont le rapport exact est $5/4$. Cette tierce est plus faible que celle du tempérament égal qui est notre référence implicite d'évaluation de la justesse¹⁷. Les écarts entre les intervalles de la série harmonique et ceux des échelles musicales sont l'objet de discussions permanentes (voir chapitre 8, page 401).
- Remarque 3 : au fur et à mesure que l'on monte dans l'aigu la grandeur des intervalles entre les sons successifs de la série harmonique décroît régulièrement. À partir du 26^e harmonique tous les intervalles sont inférieurs au demiton chromatique.

Inversement à l'analyse, on peut faire la synthèse harmonique d'un son complexe périodique par addition de sinusoides ayant des fréquences multiples les unes des autres (Son **1.13a** et **1.13b**).



Son 1.13a (28")

Synthèse
additive
progressive



Son 1.13b (25")

Écoute
de l'harmonique
isolé avant
addition
(voir page 31)

17. En toute rigueur, aucun des intervalles d'un piano, même bien accordé, ne correspond exactement à un intervalle de la série harmonique. En revanche, la quinte des cordes à vide d'un violoniste ou l'octave réalisée sur un orgue sont des intervalles purs, sans battement, comme ceux des harmoniques.

5. Vocabulaire : de la musique à l'acoustique et inversement

Avant de poursuivre, il importe de définir le sens de quelques termes utilisés en acoustique. Certains comme « fondamental » ont des sens multiples que l'on doit préciser à chaque fois. D'autres comme « harmonique » désignent en musique des phénomènes tout à fait différents. Le lecteur pourra aussi se reporter au Glossaire.

5.1. Les divers types de sons

Un *son pur* est produit par une vibration simple, sinusoïdale ; il ne comporte qu'une seule fréquence. Il est très facile de synthétiser un son pur, mais peu de sources naturelles en produisent, à l'exception du sifflet oral.

Tout son qui n'est pas pur est *complexe*. Chacune des composantes d'un son complexe périodique est un son pur. Un son complexe *périodique* est harmonique. Un son complexe *apériodique* est *inharmonique* ou *quasi périodique* lorsque les composantes ont des fréquences voisines de celles des harmoniques. C'est le cas du piano¹⁸. Les instruments à cordes frappées ou pincées ne sont pas (en toute rigueur) harmoniques. On définit un degré *d'inarmonicité* qui varie avec les caractéristiques des cordes (raideur). Nous sommes particulièrement sensibles à l'inarmonicité des sons graves de la harpe et du piano.

5.2. Les termes à connaître : harmoniques, partiels, fondamental

Ces termes ont des sens différents selon que l'on parle des composantes simultanées d'un son, ou que l'on considère les sons produits par les différents modes vibratoires d'un corps.

5.2.1. Les composantes simultanées d'un son isolé

Harmonique est un terme que l'on doit réserver pour désigner une composante d'un son périodique. Par définition, la fréquence d'un harmonique est un multiple entier de la fréquence de l'harmonique 1 ou *fréquence fondamentale*¹⁹.

Partiel est un terme général qui peut désigner toute composante fréquentielle isolable du spectre d'un son quelconque, mais le plus souvent on l'utilise pour les sons non entretenus : les partiels d'une cloche, les partiels d'un son de piano. Le partiel le plus grave d'un son inharmonique est aussi appelé *fondamental*. Les fondeurs de cloche accordent les modes propres vibratoires de sorte que les partiels forment un accord mineur agréable à entendre. Écoutez l'analyse des partiels d'une cloche dans le Son **1.14** (voir aussi chapitre 6, page 255).

Le terme *fondamental* a donc plusieurs sens. Il arrive aussi que l'on désigne par fondamental le son produit par le premier mode propre d'un corps : on parle du *fondamental d'un tuyau* (qui est aussi le partiel 1 du tuyau).

Du point de vue perceptif, les partiels peuvent être perçus individuellement, alors que les harmoniques fusionnent en produisant la *hauteur fondamentale* du son, qu'il y ait ou non de l'énergie à la fréquence fondamentale correspondante (voir chapitre 6, page 238)



Son 1.14 (1'54)

Cloche d'église :
analyse par
filtrage

18. Dans la plupart des cas, les composantes des sons quasi périodiques ont des fréquences supérieures à celles des harmoniques des numéros correspondants. Elles sont « plus hautes » que les harmoniques et l'écart croît avec leur rang.

19. Il faut noter que, dans la communauté des chercheurs qui travaillent sur la parole, cette fréquence est désignée par f_0 .

L'adoption d'un vocabulaire rigoureux en acoustique permet de discriminer clairement les deux catégories de production sonore que nous avons présentées. Un corps vibrant en oscillations libres émet un agrégat sonore dont chaque partiel provient de la fréquence d'un mode propre. Un corps dont la vibration est entretenue périodiquement sur un mode propre donné émet un son composé d'harmoniques.

5.2.2. Les sons successifs produits par les modes vibratoires d'un corps

Lorsque le corps vibrant est long et fin (corde, tuyau), les intervalles entre les partiels des modes vibratoires successifs ont beaucoup de ressemblance avec ceux d'une série harmonique²⁰, d'où l'emploi du terme *harmonique* (au lieu de partiel) par certains instrumentistes, ce qui produit une certaine confusion.

**Partiels
d'un tuyau
ou d'une corde**

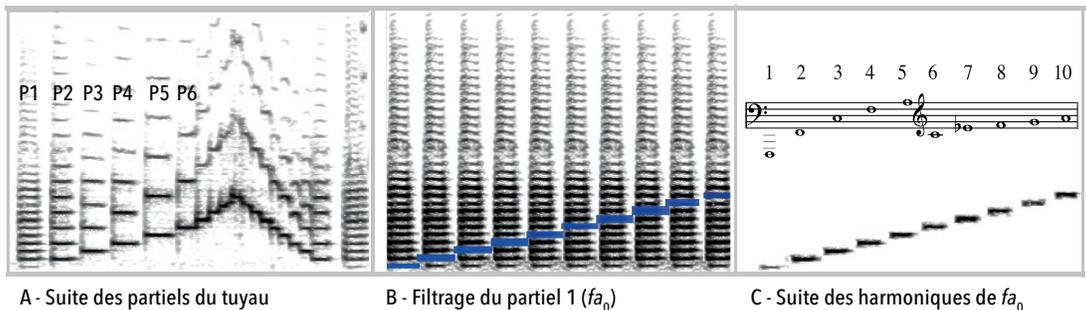


Figure 1.16 Tuba, doigté fa_0 . (A) - Analyse du jeu des dix premiers partiels du tube, en série ascendante puis descendante. Chaque partiel est un son riche en harmoniques. (B) - Le premier partiel du tube a été copié dix fois pour réaliser le filtrage des harmoniques. (C) - Extraction des dix premiers harmoniques du premier partiel du tube (logiciel Audiosculpt).

Prenons pour exemple le tuba, qui permet de jouer la série complète des modes vibratoires du tube (Son 1.15). Sur la position fa_0 , l'instrumentiste joue successivement les notes fa_0 , fa_1 , do_2 , fa_2 , la_2 , etc., sans changer de doigté, chaque note correspondant à un mode vibratoire particulier du tuyau. Sur la figure 1.16 (A), on voit bien que chaque partiel du tuyau est un son complexe ayant ses harmoniques. L'emploi du mot partiel correspond ici au fait que, pour chaque mode, la configuration vibratoire du tuyau présente plusieurs *parties*.

Pour bien marquer la différence entre *partiel du tuyau* et *harmonique d'un son*, nous avons effectué le filtrage des harmoniques du premier partiel fa_0 (C). À l'écoute du Son 1.16, on reconnaît la sonorité caractéristique des sons purs d'une série harmonique distincte de celle des partiels successifs du tuyau.

Dans le cas du trombone ténor (Son 1.22), la note sib_2 est déjà le deuxième partiel du tube, car l'intervalle entendu entre les deux premiers sons est une quinte et non une octave.

La flûte *octavie* parce que le partiel 2 est pratiquement à l'octave supérieure du fondamental, ou 1^{er} partiel (son 1.17). La clarinette n'octavie pas, elle *quintoie*, car le partiel 2 est à la douzième²¹ (octave + quinte) du partiel 1 et non à l'octave, ce qui est aussi le cas des tuyaux de flûte bouchés (bourdon d'orgue, flûte de pan)²². Il existe d'ailleurs une relation directe entre les fréquences des modes propres et le contenu spectral des sons qui fait que nous reconnaissons à l'oreille la sonorité d'un bourdon ou celle des



Son 1.15 (8"")

Tuba : jeu des partiels 1 à 10 (doigté fa_0)



Son 1.16 (7"")

Tuba : filtrage des harmoniques 1 à 10 du partiel 1 (note fa_0)



Son 1.17 (11"")

Partiels 1 et 2 : flûte traversière puis clarinette. (voir page 31)

20. L'ajustement des intervalles entre les modes vibratoires successifs est le fruit d'une longue expérience des facteurs.

21. Douzième degré de l'échelle diatonique partant du fondamental. « Douzième, Quinzième et Dix-Septième » sont des termes musicaux anciens.

22. Voir plus loin (Son 1.25) le jeu de la tilinca qui utilise les deux séries : tuyau ouvert et tuyau bouché.

notes graves de la clarinette (les partiels du premier mode) : les harmoniques impairs, dont les fréquences correspondent à celles des modes propres ont beaucoup plus d'intensité. C'est le contraire pour les instruments qui octavient.

Les *harmoniques effleurés* que l'on joue sur les instruments à cordes (violon, harpe) sont en réalité les sons *partiels des modes propres* de la corde. Le musicien excite la corde sur un mode vibratoire différent du mode habituel, qui est le premier mode. Un harmonique effleuré est un nouveau son **fondamental** qui possède des harmoniques s'il est entretenu (violon, flûte) ou ses propres partiels s'il est en oscillations libres (guitare, harpe, pizzicati de violon). Écoutez la suite des partiels d'une corde de guitare (Son 1.18).



Son 1.18 (48")

Partiels 1 à 8 :
corde de guitare

Harmoniques inférieurs (sous harmoniques)

5.2.3. La série harmonique inverse et le period-doubling

L'idée d'une série harmonique inverse, descendante, générant une suite de *sous-harmoniques* circule dans divers ouvrages de musique et sert de justification à l'existence du mode mineur. Ce concept n'a pas de réalité physique. En revanche, des recherches récentes ont permis de mettre en évidence des comportements vibratoires non linéaires donnant lieu à la production de fréquences fondamentales plus basses que le premier mode habituel. Il s'agit généralement de l'octave inférieure²³ et, plus rarement, de la quinte. La pratique en est recherchée dans certaines techniques vocales : chant tibétain, chanteuses xhosas d'Afrique du Sud, voix de Bassu des Sardes. Ces phénomènes (que l'on rencontre aussi dans certaines dysphonies) sont généralement évités dans l'esthétique classique. Ajoutons qu'un son en *period-doubling* (donc de fréquence moitié) possède, comme toute vibration périodique, une série harmonique normale, c'est-à-dire ascendante !

6. Les mélodies spectrales et les mélodies de partiels successifs : exemples musicaux

Un grand nombre de traditions musicales ont développé de par le monde l'usage de techniques de jeu basées soit sur la sélection des harmoniques d'un son par résonance, soit sur la série des partiels correspondant aux modes vibratoires successifs d'une structure.

6.1. Les mélodies spectrales : sélection d'harmoniques par résonance buccale

Plusieurs techniques musicales utilisent la sélection d'harmoniques par la cavité buccale pour produire une mélodie. Celle-ci est un résonateur assez efficace, ajustable en dimensions et d'usage universel. Sa zone d'action se situe entre 500 et 2000 Hz²⁴. Dans le chant diphonique (ou harmonique) cette sélection s'opère directement sur le spectre harmonique de la voix du chanteur qui maintient généralement la fondamentale constante, comme dans le Son 1.12 (voir page 22). Une grande diversité de techniques est pratiquée dans le monde, et notamment en Mongolie. Écoutez le Son 1.19 (voir aussi le chapitre 6, § 2.7, page 244 et le chapitre 9, § 3, page 462).



Son 1.19 (30")

Chant
diphonique

23. Phénomène connu sous le nom de *period doubling*, analysé au chapitre 9, page 464.

24. Le son que l'on produit en sifflant correspond à la fréquence de résonance de la cavité buccale, exactement comme lorsqu'on souffle sur le bord d'une bouteille. La note la plus grave (langue aplatie, très en arrière) ne descend guère au dessous de 500 Hz). Le son le plus aigu produit avec la même technique (langue très en avant, presque sur les dents) monte à 3000 Hz et plus.

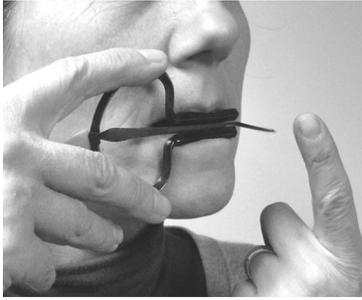


Figure 1.17 Jeu de la guimbarde.

Cliché M. C.

Le jeu de la guimbarde résulte d'un couplage entre la cavité buccale et une lame vibrante excitée de façon impulsive (figure 1.17). En toute rigueur, il s'agit de partiels quasi harmoniques. Dans l'exemple sonore **1.20**, John Wright présente les interactions entre l'instrument et le joueur et alterne mélodie chantée ou jouée à la guimbarde.

L'échelle mélodique utilisable avec ces techniques de jeu est strictement celle des intervalles entre les harmoniques (intervalles approchés pour les partiels). Nous avons vu que les intervalles musicaux entre les premiers harmoniques sont grands : octave, quinte, etc. Si l'on veut jouer un intervalle d'un ton, analogue à celui de notre système diatonique, on ne le trouve qu'entre les harmoniques 8 et 9. Plus on monte dans le rang des harmoniques et plus les intervalles se resserrent : il devient alors difficile de sélectionner à coup sûr un son précis, étant donné que la zone d'action en fréquence de la cavité buccale est réduite. Le fondamental vocal ou instrumental doit être choisi en fonction du plus petit intervalle souhaité.

Certains musiciens résolvent le problème de façon élégante en jouant avec deux fondamentaux à intervalle d'un ton. Prenons comme exemple les harmoniques de deux sons do_2 et $ré_2$.

Tableau 2. Harmoniques de deux sons à intervalle d'un ton

H1	H2	H3	H4	H5	H6
do_2	do_3	sol_3	do_4	mi_4	sol_4
$ré_2$	$ré_3$	la_3	$ré_4$	$fa\#_4$	la_4

On voit que, dès le troisième harmonique on peut jouer, en changeant de fondamental : sol_3 , la_3 , do_4 , $ré_4$, mi_4 , $fa\#_4$, sol_4 , avec les harmoniques 3, 4, 5, 6 de chacune des deux séries.

Écoutez *l'arc musical* ngbaka (figure 1.18), de l'exemple sonore **1.21** dont les deux notes fondamentales sont sol_2 (pour la corde à vide) et la_2 (pour la corde raccourcie). Voir aussi le chapitre 6, page 247 et le chapitre 8, page 402.



Figure 1.18 Jeu de l'arc musical. La corde passe entre les lèvres du musicien ; il en raccourcit la longueur à l'aide du bâtonnet de la main gauche.

Cliché M. C. Musicien, Michel Kossi, groupe Ndima.



Son 1.20a (1'05'')

Démonstrations
du jeu
de la guimbarde



**Son 1.20b
(1'14'')**

Musique
de guimbarde
Voir page 32

**Deux
fondamentaux
successifs**



Son 1.21 (31'')

Arc musical

6.2. Les mélodies produites avec les partiels d'un tuyau ou d'une corde

6.2.1. Les instruments à vent



Son 1.22 (8'')

Trombone à coulisse



Son 1.23 (31'')

Cor des Alpes



Son 1.24 (20'')

Trompe de chasse



Son 1.25 (50'')

Flûte roumaine *tilinca*

Le jeu des instruments à embouchure, ou cuivres, consiste à sélectionner la succession des sons partiels du tube. L'échelle musicale de ces instruments est directement liée à la justesse relative des modes, laquelle dépend principalement de la perce du tube (à l'exception du trombone à coulisse qui peut s'ajuster en modifiant la position de la coulisse). On apprécie la justesse en comparant les intervalles entre les partiels successifs avec ceux de la série harmonique du son le plus grave qui sert de référence. Celui-ci, très faible, est rarement joué et le jeu mélodique exploite le plus souvent les partiels 2 à 12, comme dans l'exemple du Son 1.22 joué au trombone à coulisse ténor (sans barillet).

Citons, parmi ces instruments, les cors (dont l'ancien cor d'orchestre dit « à tons de rechange »), les trompes, la trompette de cavalerie, le clairon. Écoutez aussi les exemples du cor des Alpes (Son 1.23) et de la trompe de chasse (Son 1.24). La trompe de chasse est reconnaissable par l'usage du 11^e partiel qui forme un intervalle de quarte augmentée avec la tonique *fa*. Dans le jeu des instruments de tradition occidentale le partiel 7 n'est pas utilisé : les musiciens *sautent* du son 6 au son 8. Marin Mersenne tente, dans un paragraphe entier, de trouver des explications à cette « anomalie »²⁵. Allez au chapitre 8, § 1.3, page 398 pour une discussion sur l'harmonique 7.

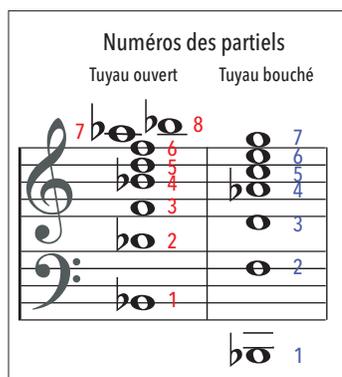


Figure 1.19 Séries de partiels de la flûte *tilinca* : tuyau ouvert et tuyau bouché.

Certaines flûtes longues et fines, sans trous latéraux comme la *tilinca* roumaine, produisent aussi des mélodies sur la suite des partiels (Son 1.25). Dans cet exemple, le musicien joue sur deux séries car, en obturant l'extrémité inférieure du tuyau avec un doigt, il obtient une autre série dont les sons, qui correspondent aux modes propres d'un tuyau bouché, s'intercalent entre ceux de la première série (voir l'analyse spectrale au chapitre 2, § 4.6, page 65). Cette technique de jeu a plusieurs avantages. La combinaison des deux séries fournit une échelle complète de seize sons alors que le flûtiste ne travaille que sur les partiels 3 à 8 de chaque série (au delà il est de plus en plus difficile de sélectionner un partiel au coup de langue). Le bruit de bouchage du tuyau joue un rôle rythmique.

Les deux séries intercalées sont présentées sur la figure 1.19 et ci-dessous : tuyau bouché (en italique), tuyau ouvert (en gras).

*sib*₀ **sib**₁ *fa*₂ **sib**₂ *ré*₃ **fa**₃ *lab*₃ **sib**₃ *do*₄ **ré**₄ *mi*₄ **fa**₄ *sol*₄ **lab**₄ *la*₄ **sib**₄

25. Voir *l'Harmonie universelle*, 1636, Livre troisième des instruments, Proposition XIV (page 252 Édition CNRS). « Expliquer pourquoi la Trompette ne fait pas la Sesquisexte dans son cinquième intervalle, et qu'elle quitte le progrez qu'elle avoit suivy iusque au sixiesme ton pour faire la Quarte qu'elle avoit desia faite au troisisme intervalle ». Une des explications de Mersenne ne manque pas de poésie : « L'on peut encore dire que la nature ayant donné les six tons, comme ses six journées ausquelles elle se repose, qu'elle imite son Autheur qui se reposa à la fin des six iours ».

6.2.2. La trompette marine

Parmi les instruments à cordes, citons la trompette marine qu'affectionne le *Bourgeois gentilhomme* de Molière.

L'instrument ne comporte qu'une corde, effleurée en divers endroits par la main gauche (voir figures 1.20 et 1.21). Observez la position de l'archet qui est situé entre le sillet et la main gauche. La mélodie utilise la suite des partiels de la corde (ou harmoniques effleurés) dont le son est considérablement transformé, voire distordu, par un chevalet instable, analogue à celui du « chien » de la vielle à roue (Son 1.26) (voir Engel, 1992 ; Leipp, 1965).



Son 1.26 (30")

Trompette marine

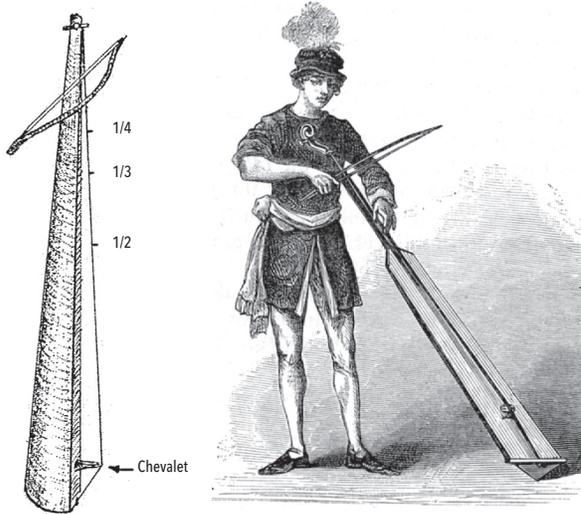


Figure 1.20 La trompette marine est un monocorde à archet dont l'échelle mélodique, obtenue par division de la corde, est celle de la suite des partiels. Comme pour le cor naturel et les flûtes de type tilinca, les intervalles sont voisins de ceux de la série harmonique.

Leipp, E., 1965, *Bulletin du GAM* n° 12.

Figure 1.21 Un joueur de trompette marine.

Colomb, C., 1878, *La Musique*, figure 113.

6.2.3. Le monocorde vietnamien

De façon similaire à la trompette marine le joueur de monocorde vietnamien (figure 1.22) joue les « harmoniques effleurés » de la corde. Une explication détaillée est donnée par le musicien dans l'exemple sonore 1.27.



Son 1.27 (33")

Jeu du monocorde, explications par Trần Văn Khê

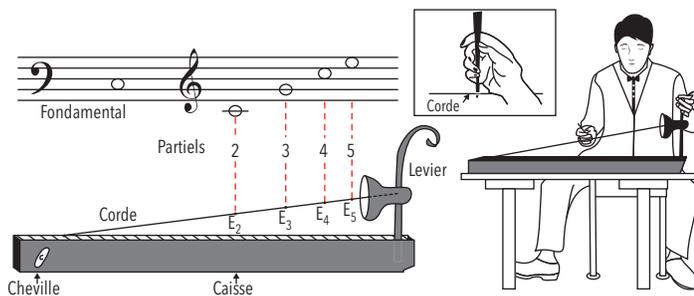


Figure 1.22 Le monocorde vietnamien. Le musicien pince la corde métallique au moyen d'un stylet de bois et, dans le même temps, il immobilise la corde à un nœud de vibration. Il obtient donc la suite des harmoniques effleurés de la corde. En changeant la tension par le jeu de la main gauche, il varie la fréquence fondamentale dans un intervalle d'octave. Pendant l'extinction du son, le musicien produit des ornements par de rapides mouvements de la main gauche.

Trần Văn Khê., 1965, *Bulletin du GAM* n° 12.



Son 1.28 (22'')

Monocorde :
musique

Pour produire les modes propres le musicien effectue de la main droite un geste qui enchaîne rapidement trois actions : l'effleurement de la corde à un point bien précis (production d'un nœud vibratoire), le pincement et la levée de la main. De la main gauche, il varie la tension de la corde en agissant sur la tige souple à laquelle elle est fixée. Cet ingénieux système confère à l'instrument des possibilités mélodiques et ornementales infinies. La musique produite n'est plus du tout dépendante des sons de la série harmonique puisque la hauteur peut être modulée par les changements de tension produits par la main gauche et le répertoire des ornements que l'on joue pendant l'extinction du son est d'une grande richesse (Son 1.28 et figure 1.23).

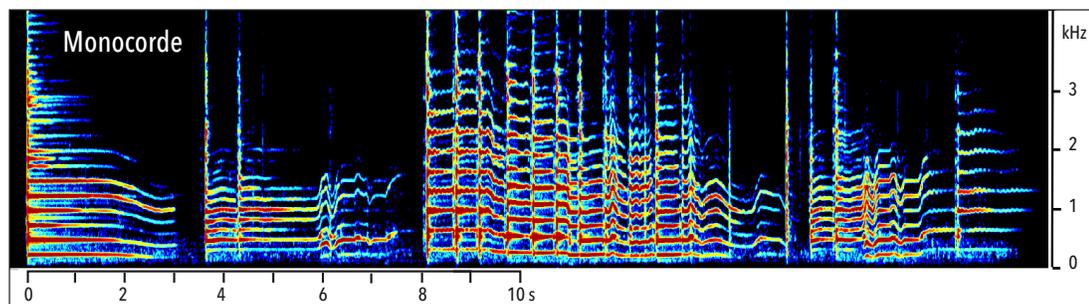


Figure 1.23 Sonagramme du jeu du monocorde (Son 1.28). Chaque nouvelle attaque de la corde correspond à un trait vertical suivi de raies harmoniques. Les dessins mélodiques sont réalisés par les changements de tension de la corde pendant l'extinction du son.

7. Les sons du chapitre 1

Remarque : certains exemples, le son 1.3 et les sons filtrés dont la première composante est grave (trombone, basson, tuba, cloche), ne sont audibles qu'avec une bonne qualité d'écoute.

7.1. Types d'excitation et modes vibratoires

Son 1.1 – Son du verre percuté. [M. C.]

Son 1.2 – Son du même verre frotté au doigt. [M. C.]

Son 1.3 – Vibraphone. Lame fa_2 percutée puis jouée à l'archet. [Base de données McGill]

Son 1.4 – Harpe. Corde mi_2 , pincée au doigt puis entretenue avec un archet. [M. C.]

Son 1.5 – Cor des Alpes. Signal recueilli au pavillon d'un cor des Alpes qu'on excite par une impulsion à l'embouchure. Fréquence 46,72 Hz (environ fa_0). [M. C.]

Son 1.6 – Diapason à fourche. L'instrument est frappé puis posé sur une table. On entend d'abord un son très aigu qui est le deuxième mode vibratoire du système puis le premier mode vibratoire, le la_3 proprement dit, amplifié par couplage avec la table. [M. C.]

7.2. Analyses auditives des composantes d'un son

- Son 1.7** – Verre percuté. Successivement : son global (mi_4) ; analyse par filtrage analogique des premiers partiels ; son global. [M. C.]
- Son 1.8** – Verre frotté au doigt. Successivement : son global (mi_4) ; analyse par filtrage analogique des dix premiers harmoniques ; son global. [M. C.]
- Son 1.9** – Harmonica. Le son $ré_2$ est mis en boucle (10 s.) puis filtré. On entend la succession des harmoniques amplifiés isolément dans l'ordre ascendant. À partir de l'harmonique 10 ($fa\#_3$), particulièrement intense, il devient difficile de les séparer. Filtrage descendant, puis le son global est donné à entendre de nouveau. [M. C.]
- Son 1.10** – Trombone à coulisse, note sol_1 . Séquence d'un son répété quatre fois de suite par le musicien, mise en boucle et filtrée. On entend successivement : le son original ; H1 (4 fois) ; H2 (4 fois) ; H3 (4 fois) ; H4 (4 fois) ; H5 à H16 répété 2 fois ; puis la suite balayée rapidement vers l'aigu ; pour finir le son global. [M. C.]
- Son 1.11** – Basson, note sib_1 (117 Hz) avec vibrato. Successivement : le son répété deux fois ; puis filtrage ascendant des harmoniques H1 à H8 (une fois) ; montage rapide jusque vers 3 kHz ; son global à la fin (deux fois). [M. C.]
- Son 1.12** – Chant diphonique. Exemple didactique d'un glissando spectral ascendant et descendant produit sur un son vocal fixe. L'exemple normal (do_2 , diapason haut) puis le même exemple ralenti à demi-vitesse et entendu à l'octave inférieure. La technique de chant diphonique a pour effet de produire un *filtrage par résonance*, tout à fait analogue aux exemples précédents produits avec un filtre analogique. Exemple chanté par Tràn Quang Hai. [M. C.]

7.3. Exemples de synthèse additive numérique d'un son périodique

- Son 1.13** – Deux exemples de synthèse d'un son composé de 10 harmoniques. Son 1.13a Synthèse n° 1. Successivement le son global, puis addition progressive des harmoniques (1, 1 + 2, 1 + 2 + 3, etc.). Son 1.13b Synthèse n° 2. Le son global, puis présentation isolée de l'harmonique avant son addition (1 ; 2 et 1 + 2 ; 3 et 1 + 2 + 3 ; 4 et 1 + 2 + 3 + 4, etc.). Son global à la fin. [M. C.]

7.4. Partiels et harmoniques

- Son 1.14** – Cloche sonnée à *la volée* (4 coups). Filtrage des différents partiels, du grave à l'aigu (4000 Hz) puis de nouveau le son global à la fin (5 coups). Les partiels de cette cloche sont assez bien accordés mais ne suivent pas du tout la série harmonique. [M. C.]
- Son 1.15** – Tuba : la suite des partiels obtenus sur le doigté du fa_0 . Annonce, puis jeu des dix premiers partiels en série ascendante puis descendante. [G. Bucquet, LAM]
- Son 1.16** – Tuba : les harmoniques du partiel 1, fa_0 . Écoute des 10 premiers harmoniques du partiel obtenus par filtrage numérique (logiciel Audiosculpt). [M. C.]
- Son 1.17** – Octavation puis quintoiement. Flûte traversière en *ut*, doigté tout bouché : les deux premiers partiels du tuyau (do_3 , do_4). Clarinette en *sib*, doigté tout bouché : les deux premiers partiels du tuyau ($ré_2$, la_3). Voir chapitre 2, figure 2.32 pour l'analyse. [Joe Wolfe, site Internet]

Son 1.18 – Harmoniques effleurés (ou partiels) d'une corde de guitare, $ré_2$. La corde à vide – qui est le partiel 1 – puis les partiels suivants, $ré_3$, la_3 , $ré_4$, etc., E. Péliissier. [V. Mons]

7.5. Mélodies d'harmoniques : exemples musicaux

Son 1.19 – Chant diphonique (homme). Fondamental de la voix : la_2 . *Chants de Mongolie*, n° 6, 1989 ; chanteur : T. Ganbold. [CD Auvidis W 260009]

Son 1.20 – Jeu de la guimbarde. Son 1.20a : 1^{re} guimbarde (fondamental 59 Hz, sib_0 – 20 cents). Le musicien donne successivement les « notes » de la guimbarde seule, du grave à l'aigu, puis une petite *mélodie avec la bouche seule*, et de nouveau avec la guimbarde. Son 1.20b : 2^e guimbarde (fondamental 71,8 Hz, $ré_1$ – 40 cents). Mélodie alternativement jouée à la guimbarde (certains passages sont sans souffle) et chantée. À noter : la voix chante trois octaves plus bas que la mélodie harmonique de la guimbarde. Exemples donnés par John Wright : disque 33 t., Spécial instrumental, *la guimbarde*, page 1. [*Le Chant du Monde*, LDX 74434]

Son 1.21 – Arc musical. Jeu rapide et rythmé sur deux fondamentaux : sol_2 et la_2 . Arc ngbaka, joué par N. Massemokobo (Centrafrique). [S. Arom, LAM, 1967]

7.6. Mélodies de partiels (tube ou corde)

Son 1.22 – La suite des partiels du trombone à coulisse, sur la position sib . Jeu des partiels dans l'ordre ascendant et descendant. Le premier son joué (sib_1), est le second partiel du tube. Musicien B. Sluchin. [Archives LAM]

Son 1.23 – Cor des Alpes : mélodie enregistrée en Suisse au cours d'un concours. Le fondamental est un *fa*. La mélodie commence sur le partiel 5 (tierce), ce qui se confirme par la succession des trois sons « *fa, sol, la* » dont les intervalles (tons) se situent entre les partiels 8, 9 et 10. On remarquera que le partiel 7 n'est pas utilisé. [Document W. Aebi, LAM]

Son 1.24 – Partiels de la trompe de chasse sur un *mib*. Le premier son joué, mib_1 (80 Hz), est déjà le deuxième partiel du tuyau. Le partiel 7 n'est pas joué par le sonneur (M. Pietri). On entend donc successivement les partiels 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12. [LAM]

Son 1.25 – Flûte roumaine tilinca. Le musicien joue sur deux séries de modes propres : celle du tuyau ouvert (fondamental sib_2) et celle du tuyau bouché (fondamental sib_1) *Anthology of Rumanian Folk Music* ; coffret 33 t. disque n° 1, page 3a. [Electrecord EPD 78]

7.7. Instruments à cordes fonctionnant sur la suite des partiels

Son 1.26 – Trompette marine. Fondamental de la corde : $do_2 = 130$ Hz. Le premier son est le partiel 4 (double octave). Quand le *ré* apparaît, c'est le partiel 9. Extrait de *Guide des instruments baroques* ; T. Kosteletzki (1660-1722), joué par Max Engel. [Ricerca 93000]

Son 1.27 – Monocorde vietnamien. Technique de jeu présentée par M. Trân Van Khe (1965). Le « premier son », annoncé aussi « premier nœud », correspond au partiel 2 de la corde. [Archives LAM]

Son 1.28 – Monocorde vietnamien. Court exemple musical joué par M. Trân Van Khe. Notez l'importante variation de la fréquence de jeu d'un partiel donné obtenue par l'action de la main gauche sur la tension de la corde (dans cet exemple, on entend la descente à la quinte inférieure et la montée à la quarte supérieure). [Archives LAM]

ÉCOUTE MUSICALE ET ACOUSTIQUE



Point d'entrée de cet ouvrage, les 420 exemples sonores fournis sur le DVD-Rom placent le lecteur dans une situation d'écoute attentive, à partir de laquelle il va découvrir au fil des chapitres comment analyser la structure acoustique des sons et évaluer leurs qualités musicales.

L'analyse s'appuie sur l'usage du sonagramme, représentation visuelle qui révèle la structure spectrale et temporelle des sons, et se lit à la manière d'une partition musicale, sans nécessiter de connaissances avancées en acoustique.

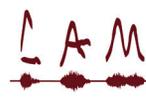
Mais l'analyse spectrotemporelle ne suffit pas pour rendre compte des qualités d'un son dont l'écoute diffère d'une personne à l'autre. L'auteur fournit ainsi une synthèse des données récentes sur le système auditif, la reconnaissance des formes et la catégorisation cognitive qui permettent ensuite d'aborder l'étude des qualités musicales des sons – intensité, hauteur, timbre –, les problèmes posés par l'accordage des sons instrumentaux et la grande diversité des écoutes de la voix humaine.

Après des études de musique et de musicologie, Michèle Castellengo rejoint le Laboratoire d'acoustique musicale (LAM) d'Émile Leipp où elle soutient une thèse sous sa direction. En 1982, elle entre au CNRS et prend la direction du LAM. Ses recherches portent sur l'acoustique des flûtes, de l'orgue, de la voix chantée et, plus généralement, sur la perception des sons musicaux. Elle crée en 1989 la classe d'acoustique musicale du Conservatoire national supérieur de musique et de danse de Paris et dirige le master Atiam (Paris 6/Ircam/SupTélécom) de 1999 à 2003. Elle est aujourd'hui directrice de recherche émérite au CNRS.

Contenu du DVD-Rom d'accompagnement

- Des « livrets-sons » au format ePub 3 (un par chapitre) pour écouter les sons sur son Smartphone ou sa tablette.
- Le livre complet au format PDF avec les 420 sons aux formats MP3 et WAV.

CONFIGURATION NÉCESSAIRE. Pour les livrets-sons au format ePub : Appli iBooks pour iPod (version 4 ou ultérieure), iPhone (version 3g ou ultérieure) ou iPad (version 2 ou ultérieure), avec iOS 6 ou version ultérieure – Appli Giden Reader (gratuite) ou Moon+ Reader (gratuite) pour Smartphones ou tablettes Android, avec Android 4 ou version ultérieure. Pour le livre au format PDF : sur Mac/PC : Adobe Acrobat Reader 6 ou version ultérieure, Mac OS X 10.0 ou version ultérieure, Windows XP ou version ultérieure – Sur iPad (version 2 ou ultérieure) : applis payantes PDF Expert (9,99 €) ou ezPDF Reader (3,99 €), iOS 6 ou version ultérieure – Sur tablettes Android : appli payante ezPDF Reader (3,22 €), Android 4 ou version ultérieure.



www.editions-eyrolles.com
Groupe Eyrolles | Diffusion Geodif

Studio Eyrolles © Éditions Eyrolles

Code éditeur : G13872
ISBN : 978-2-212-13872-6