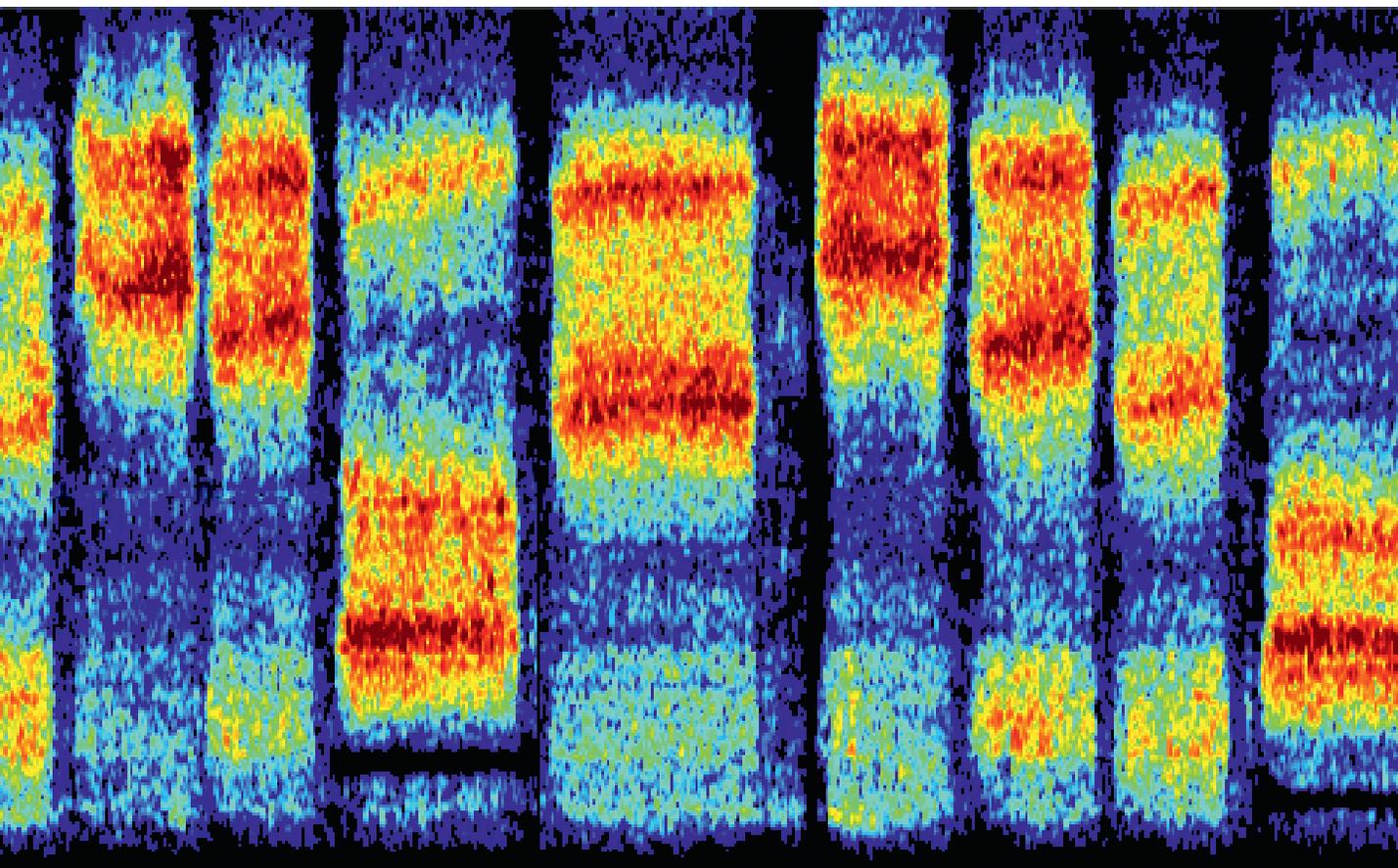


Michèle Castellengo

# 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**

# 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.

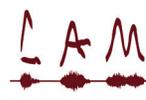
Mais l'analyse spectrotemporelle ne suffit pas pour rendre compte des qualités d'un son dont l'écoute diffère d'une personne à l'autre. L'auteur fournit ainsi une synthèse des données récentes sur le système auditif, la reconnaissance des formes et la catégorisation cognitive qui permettent ensuite d'aborder 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](http://www.editions-eyrolles.com)  
Groupe Eyrolles | Diffusion Geodif

Studio Eyrolles © Éditions Eyrolles

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

“ Avec l'exigence d'une musicienne et la rigueur d'une scientifique ouverte à toutes les musiques et voix du monde, l'auteur réunit dans cet ouvrage le fruit d'une vie consacrée à la recherche et à l'enseignement.

Ses connaissances, autant que la manière de les partager, se sont enrichies et affinées au contact des musiciens, des acousticiens, des linguistes, des luthiers, des compositeurs et des ethnomusicologues, qui viennent chercher dans l'acoustique musicale des réponses à leurs questions.

Par la richesse et la diversité des exemples sonores qu'il contient, ce livre invite à de fascinantes expériences d'écoute, où le plaisir de la découverte accompagne la satisfaction de comprendre : il ravira autant les musiciens et mélomanes curieux que les passionnés du son.

**Hugues Genevois, directeur du LAM**



# ÉCOUTE MUSICALE ET ACOUSTIQUE



Michèle Castellengo

# ÉCOUTE MUSICALE ET ACOUSTIQUE

Avec 420 sons et leurs sonagrammes décryptés

Préfaces de Jean-Sylvain Liénard et Georges Bloch

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](mailto: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](http://www.editions-eyrolles.com)

# Préfaces

## Jean-Sylvain Liénard

*Directeur de recherche émérite au CNRS*

Ce livre n'est pas un livre comme les autres. C'est un support écrit et sonore, destiné à guider le lecteur auditeur dans la découverte d'un paysage infini où se mêlent musique et acoustique. Michèle Castellengo présente ici la quintessence d'une cinquantaine d'années de recherche passionnée, originale et exigeante, sur la structure, la production et la perception des sons. Son oreille exceptionnelle, sa curiosité pour le monde auditif et la qualité de son travail expérimental l'ont depuis longtemps amenée à analyser tous les sons qu'elle rencontre. Elle est aidée en cela par une méthode de travail et par un outil d'analyse, le *sonagraphe*, qui permet de représenter le son comme le fait une partition musicale, avec le temps en abscisse et la fréquence – hauteur – en ordonnée. Mieux qu'une partition, le sonagramme indique également le timbre du son. En figeant le temps, il permet d'en examiner à loisir les moindres détails et, par des réglages adéquats, d'en révéler les structures d'une manière proche de la perception naturelle.

La méthode de travail est celle qu'a inaugurée Émile Leipp, fondateur et responsable du LAM, Laboratoire d'acoustique musicale, dans les années 1960-1980. Elle repose sur l'idée que les instruments de musique, élaborés au fil du temps par les luthiers, représentent un compromis optimum entre les capacités sensorimotrices des exécutants, les capacités perceptives des auditeurs, les techniques de lutherie disponibles et les canons esthétiques d'une société et d'une époque. Pour comprendre comment fonctionne un instrument il faut donc, en tout premier lieu, prendre en compte ce que les praticiens, facteurs et instrumentistes en disent, même lorsque les règles de leur art se sont fondues dans une tradition qui n'est arbitraire qu'en apparence. Ce n'est qu'après que l'on peut, par l'analyse, en découvrir les raisons, souvent extraordinairement fines et pertinentes, et éventuellement contribuer à résoudre les problèmes posés par l'évolution continue des techniques de lutherie et des styles musicaux. Une telle doctrine implique une ouverture sur diverses disciplines, en particulier la physique, la psychologie, la musique, pour n'en citer que quelques-unes. C'est pourquoi le LAM a d'emblée rassemblé un auditoire et des collaborateurs venant de tous horizons.

Michèle Castellengo a été, dès l'origine, la cheville ouvrière du laboratoire. Elle est rapidement devenue experte dans l'utilisation et les réglages du *sonagraphe*, à une époque où l'acoustique s'intéressait plutôt aux sons fixes et à leur représentation fréquence-amplitude. Sa spécialité a toujours été de se fier d'abord à son écoute pour repérer les phénomènes intéressants sur le plan musical ou perceptif, puis de chercher la meilleure manière de les mettre en évidence dans les sonagrammes. Elle a ainsi analysé diverses classes de sons : la flûte, le clavecin, le piano et l'orgue ; la parole, la voix et le chant ; les sons de musiques pratiquées dans d'autres cultures que la nôtre ; les chants d'oiseaux et les scènes sonores que l'on rencontre dans la vie de tous les jours. Ces études, souvent menées à l'occasion de rencontres avec des praticiens de la musique, constituent un ensemble d'où émerge une vision cohérente du monde sonore, allant de sa production par une source humaine ou physique à sa perception par l'auditeur. C'est cette vision d'ensemble qui nous est restituée dans le livre de manière pédagogique et intuitive.

Dans les années 1960, l'enthousiasme partagé par les chercheurs du LAM pour la représentation sonographique les a conduits à imaginer l'opération inverse : passer du document sonagramme au son correspondant. Cet appareillage, baptisé *Icophone*, construit au Laboratoire de mécanique de l'université Paris VI, permettait de transformer instantanément en sons les sonagrammes schématiques tracés à la main sur une bande transparente. Le son résultant n'était pas très harmonieux, mais la parole ainsi reproduite était compréhensible, pour peu que les schémas respectent l'évolution temporelle des structures acoustiques du signal original. À côté de développements inspirés par la théorie de la forme, il est apparu qu'on pouvait découper le flux de parole en éléments allant d'un son au suivant de façon à respecter les transitions, essentielles pour l'intelligibilité. Michèle Castellengo a mis au point expérimentalement un dictionnaire d'environ 600 éléments couvrant la langue française, permettant de construire des phrases nouvelles par assemblage à la manière des dominos. La méthode, requérant peu de mémoire, se prêtait à une mise en œuvre informatique, réalisée ultérieurement au LIMSI, Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur, laboratoire de mécanique des fluides nouvellement installé sur le campus d'Orsay. Par la suite le LIMSI a continué dans la voie du traitement automatique de la parole. Le thème s'est élargi à l'ensemble de la communication homme-machine, qui occupe aujourd'hui plusieurs centaines de chercheurs, enseignants et doctorants. Seuls les plus anciens savent que cette activité majeure du laboratoire a démarré au LAM en 1965 à partir d'une curieuse machine à inverser les sonagrammes. Ainsi va la recherche...

Le terme de parole désigne ce qui, dans le signal oral, porte l'information linguistique. La voix en est le support physique et, bien entendu, les deux notions sont fortement dépendantes l'une de l'autre. La voix chantée joue un rôle primordial en musique, dans toutes les cultures. Dans la musique classique européenne, tous les apprentis chanteurs sont confrontés au problème du passage, discontinuité de timbre qui s'entend quand on produit un glissando allant de l'extrême grave à l'extrême aigu. Les passages sont dus à des transitions entre plusieurs régimes vibratoires des cordes vocales. Quatre régimes vibratoires distincts, appelés mécanismes, ont été mis en évidence au LAM et cette notion fondamentale commence à être reconnue dans la communauté scientifique de la voix. Michèle Castellengo a également mené ou encadré des études sur d'autres aspects de la voix chantée, toujours en relation étroite avec des chanteurs professionnels. Elle s'est aussi intéressée au chant multiphonique que l'on trouve dans certaines cultures populaires ou extra-européennes ; les exemples spectaculaires présentés au chapitre 9 témoi-

gnent à la fois du talent des artistes et de la pertinence des explications obtenues au moyen de l'analyse sonographique.

Un autre point à souligner est l'intérêt porté aux processus perceptifs et cognitifs mis en œuvre dans l'activité d'écoute. La psychoacoustique est une discipline à part entière, qui utilise une méthodologie rigoureuse, avec des sons calibrés et des tests validés statistiquement. Elle semble donc très loin de l'écoute individuelle de fines nuances musicales. Pourtant Michèle Castellengo cherche en permanence à interpréter ses résultats en fonction des connaissances acquises sur la perception auditive. Certaines de ses études conduisent à poser des questions de nature psychoacoustique. Comment se fait-il, par exemple, que la zone fréquentielle allant approximativement de 500 à 1 700 Hz s'avère si importante pour la perception du contenu des sons, alors que l'on sait depuis longtemps que le maximum de sensibilité de l'oreille se trouve aux alentours de 3 000 Hz ? Dans la dimension temporelle, il est fascinant de constater que, selon la cadence de répétition d'une simple impulsion sonore, la sensation produite va d'une suite de clics distincts à un son doté d'une texture rythmique sans hauteur, puis à un son complexe pourvu d'une hauteur, et enfin à un son très aigu sans sensation de hauteur. Des observations de ce genre, traitées empiriquement par les musiciens à des fins artistiques, se posent en permanence en acoustique musicale et constituent des objets d'étude encore peu explorés en psychoacoustique.

Cet ouvrage arrive à un moment où le son occupe une place inédite dans notre société : sons de la radio, sons de la rue, bruit, parole, musique, télévision, enregistrement, transmission, sonorisation, insonorisation, communication, malentendance : le son est partout. Les nouveaux outils numériques permettent de produire tous les sons imaginables, mais, pour en faire bon usage, musiciens et designers sonores devront être en mesure de choisir ceux qui correspondent à leurs besoins précis. Pour ces créateurs, pour les concepteurs de systèmes sonores et pour les « ingénieurs en sensations » dont Abraham Moles avait prévu l'arrivée avec trente ans d'avance, les connaissances exposées dans ce livre s'avéreront rapidement indispensables. Pour les autres lecteurs, amoureux du son, de la musique et de la science, elles seront une double source de joie : joie de l'esprit, par l'analyse et la compréhension, et joie sensorielle, par l'écoute et la découverte d'un monde sonore sans limite.



## Georges Bloch

*Compositeur et chercheur*

C'était dans les années 1980 : les quelques étudiants français du département de musique de l'université de Californie à San Diego le surnommaient « le fils d'Éric ». C'était bien peu respectueux pour un professeur non seulement admiré pour sa culture et son inventivité musicale, mais qui, de plus, souffrait d'une forme rare de myopathie qui l'obligeait à se déplacer en chaise roulante. Mais Robert Erickson (1917-1997) était un monsieur spécial et son séminaire était un passage obligé à UCSD. On aurait pu l'appeler un séminaire d'orchestration, si le terme n'avait eu encore à l'époque une connotation très post-berliozienne ; ou « séminaire sur le timbre », si « timbre » n'était pas devenu un terme tellement polysémique qu'on ne savait plus de quoi il s'agissait exactement.

Chez Erickson, on savait de quoi on parlait : il avait un point de vue, qu'il ne nous obligeait absolument pas à partager, mais qui permettait de savoir sur quelles prémisses se fondait sa recherche ; et il avait une volonté encyclopédique d'explorer toutes les voies par lesquelles un compositeur peut imaginer des structures musicales à partir du son lui-même. De ses réflexions était sorti un livre, *Sound Structures in Music*, peut-être le seul « traité d'orchestration » intéressant du xx<sup>e</sup> siècle.

Hélas, dans ce livre, il y a un problème : il n'y a pas de son. Pour ceux qui ont eu la chance d'assister à son cours, aucune importance : nous passions notre temps à écouter des enregistrements, à analyser des partitions en détail, et des interprètes venaient faire des démonstrations. Quand on a juste le livre, c'est plus difficile, car les copies de partitions d'orchestre réduites à la taille d'un bouquin deviennent vite illisibles ; et puis, justement, tout le son n'est pas sur la partition. Or, le travail d'Erickson était directement issu de sa compétence comme compositeur et, aussi, de sa curiosité : dès qu'il découvrait une combinaison sonore qui l'étonnait, il voulait savoir comment cela marchait.

L'ouvrage de Michèle Castellengo a de nombreux points communs avec celui d'Erickson. Tout d'abord, il résulte d'une longue expérience d'écoute, plus précisément d'écoute *curieuse*. En revanche, il possède un grand atout que n'avait pas son

prédécesseur. Il commence par le début : les sons y sont. Rien que pour cela, ce « livre » est incroyable, inestimable : écoutez ces sons inouïs ; après, vous aurez envie d'en savoir plus. On peut même aller plus loin : le simple fait d'écouter ces sons rend savant, simplement parce que ce sont presque tous des sons fascinants, captivants, et parce qu'ils questionnent l'écoute.

Ce point de départ – qui est aussi un point d'arrivée – ne vaut pas que pour le lecteur : c'est aussi le point de départ de l'auteur. En effet, comme celui d'Erickson, ce livre s'appuie sur un point de vue, clairement exprimé dans le quatrième chapitre, celui concernant la perception. Ce point de vue, dit écologique, part du « sujet connaissant », et surtout de l'expert de la pratique du son. Michèle Castellengo a profité de la myriade de savants qui ont fréquenté le Laboratoire d'acoustique musicale (LAM) de Jussieu : des acousticiens, bien sûr, mais aussi des instrumentistes, des luthiers, des linguistes, des compositeurs. Essentiellement des gens dont l'écoute est le métier et la passion. Comme disait le « fils d'Éric » dans son séminaire : « tous les clarinettes distinguent les changements de registre ; allez donc voir un clarinettes et demandez-lui de vous les jouer et de vous les expliquer jusqu'au moment où, vous aussi, vous les entendrez, y compris lorsqu'on les masque ».

On part donc du son, et, plus précisément, de l'écoute experte de ce son. Il y a les « oreilles d'or » de la marine, il y a « l'écoute critique » des preneurs de son, l'écoute spécialisée de ceux qui font de la musique électroacoustique, et, bien entendu, l'écoute qu'acquière les instrumentistes à la suite de la pratique quotidienne de leur instrument. C'est cela qui intéresse Michèle Castellengo : comment on écoute, qu'est-ce qu'on écoute, et comment vous, moi, Pierre-Yves Artaud, M. Dupond, avec sa compétence – ou son ignorance – de musicien, de luthier, de soudeur, de chauffeur de taxi, de berger jouant du cor des Alpes, d'amateur de musique baroque, de spécialiste de techno, projette son savoir sonore et ses représentations sur ces sons. Répétons-le : c'est ce point de vue sur l'écoute qui fait toute la valeur de cet ouvrage, même si on ne le partage pas. En effet, pour citer l'auteur elle-même : « Il faut mettre en garde le lecteur sur le fait que des termes comme *perception*, *information*, *forme*, revêtent des sens et des contenus souvent fort différents d'un ouvrage à l'autre. » Il y a un point de vue revendiqué ? Au moins, on sait de quoi on parle.

Le LAM de Michèle Castellengo, c'est aussi une aventure de plus de cinquante ans, et des dizaines de sujets de recherche, dont beaucoup se retrouvent dans ce livre. Cela donne un ouvrage dense : en vingt-cinq pages, on traite de la voix humaine, depuis les traités de chant du XIX<sup>e</sup> siècle et les articles fondateurs de Sundberg sur les formants jusqu'aux derniers travaux de Nathalie Heinrich sur l'effet des rapports entre les vibrations de la glotte et du larynx. Vingt-cinq pages, c'est peu pour beaucoup de chose, surtout avec tous ces sons merveilleux : la *quintina* sarde, divers types de chant harmonique, les résonances buccales de guimbarde. De toute façon, les sons y sont.

Un ouvrage si compact pourrait se résumer à une sorte de dictionnaire raisonné de l'écoute musicale de l'acoustique – ce qui ne serait déjà pas si mal, d'ailleurs. Mais c'est bien plus, car l'expérience pédagogique de Michèle Castellengo, notamment à la classe d'acoustique musicale du Conservatoire de Paris, fait que la présentation des questions est toujours passionnante. Les questions du timbre, de la perception des hauteurs et des intensités restent ce qu'elles sont : des questions, qu'il convient de préciser en fonction des expériences sonores. Pendant de nombreuses années,

l'auteur a réussi à faire dialoguer divers spécialistes de l'écoute, en essayant de leur faire cracher ce qu'ils entendaient lorsqu'ils maniaient les sons. C'est une pédagogie qui n'était pas désintéressée : toute sa recherche partait de là, de ces écoutes expertes !

Dans ce livre, les processus d'écoute des experts, qui produisent, travaillent ou utilisent le son, sont décortiqués ; c'est au lecteur de s'y mesurer. Parmi les exemples sonores, il y en a aussi quelques-uns volontairement banals, comme le premier, celui qui ouvre l'introduction ; on finit cependant par leur accorder autant d'attention qu'aux extraits sonores plus inouïs de cet ouvrage – et ils sont nombreux ! On veut comprendre : les sons y sont.



# Avant-propos

Voici un livre à lire et à écouter qui offre plus de 400 exemples sonores patiemment récoltés au long de décennies de recherches en acoustique sur les sujets les plus divers : des flûtes à l'orgue, des cloches aux oiseaux, de la parole synthétique au chant lyrique ou traditionnel. En associant l'audition de sons qui réjouissent les oreilles, leur visualisation et la lecture de données explicatives, notre ambition est d'introduire dans l'univers de l'acoustique les musiciens et les auditeurs curieux, en quête de connaissances sur le monde sonore et les perceptions qu'ils en ont.

Les sons n'ont qu'une existence éphémère : à peine entendus, ils s'évanouissent, ne laissant en mémoire qu'une trace réduite sur laquelle il est difficile d'échanger des impressions comme nous pouvons le faire à la vue d'un paysage ou d'une scène photographiée. De surcroît, si plusieurs auditeurs entendent la même séquence sonore et qu'on les invite à en décrire les caractéristiques et les qualités, on constate une grande diversité de réponses : tous entendent le même son, mais chacun le perçoit et l'écoute différemment. Il faut donc capter les sons, comme l'a merveilleusement anticipé Rabelais au XVI<sup>e</sup> siècle<sup>1</sup> et en donner une représentation objective. L'analyse sonographique aujourd'hui à la portée de tous grâce à l'informatique est abondamment utilisée dans le livre, car elle possède un double avantage. C'est une visualisation du son assimilable rapidement, qui s'apparente à l'écriture musicale et qui offre la possibilité d'aborder, quand elle est couplée à l'écoute, l'étude rigoureuse des paramètres acoustiques des sons.

## La démarche de l'ouvrage

La plupart des ouvrages français sont assez spécialisés et peu accessibles au commun des mortels. Les livres d'acoustique à l'exception de celui d'Émile Leipp<sup>2</sup> sont réservés à des lecteurs pourvus d'un bon niveau scientifique et n'abordent que rarement l'analyse des sons et leur perception ; les livres sur la musique s'intéressent peu à la matière sonore elle-même ; quant aux ouvrages traitant de la perception et de la cognition, ils donnent une large place au sens visuel, ne laissant que la portion congrue à une perception auditive de sons de laboratoire.

Nous avons donc souhaité réunir dans un seul livre les données issues des différentes disciplines qui permettent de comprendre les phénomènes sonores et leur écoute, tout en restant accessible au plus grand nombre. Les deux premiers chapitres présentent les notions élémentaires à connaître sur la production des sons, leur

---

1. *Le Quart Livre*, chapitre LV, « Comment en haulte mer Pantagruel ouyt diverses parolles dégelées ».

2. *Acoustique et musique*, 1971, Masson : Paris ; réédité en 2010 aux Presses des Mines.

analyse, en prenant délibérément comme exemples sonores les sons riches et intéressants de la musique. Le troisième chapitre offre une présentation schématique du système auditif et de ses capacités d'analyse du signal sonore ; le quatrième aborde à l'aide de la Gestalttheorie et de la catégorisation perceptive la perception sonore d'un auditeur confronté à différentes situations d'écoute selon qu'il entend un signal imprévisible, les sons habituels de son environnement, ceux d'une conversation dans laquelle il est engagé ou ceux de la musique. Ainsi munis de connaissances sur la structure acoustique des sons et sur nos stratégies d'écoute, nous pouvons aborder l'étude des qualités essentielles des sons musicaux : l'intensité et les caractéristiques qui font qu'un son émerge d'un ensemble (chapitre 5) ; la hauteur des diverses sortes de sons instrumentaux (chapitre 6) et la vaste question du timbre, particulièrement développée dans le chapitre 7 selon une approche nouvelle. Le chapitre 8 traite de questions spécifiques aux musiques mélodiques et harmoniques dont la dimension privilégiée est la hauteur (intervalles, systèmes d'accordage). Enfin il nous tenait à cœur d'offrir dans le dernier chapitre quelques exemples d'application de toutes ces notions à la voix humaine, l'instrument que chacun de nous possède.

On trouvera dans les annexes les conventions de notation (musicale, acoustique), quelques documentations complémentaires, une bibliographie conséquente ainsi qu'un glossaire très détaillé des termes en usage dans ce livre.

Le contenu de l'ouvrage et la pédagogie qui est à l'œuvre bénéficient de l'expérience acquise au cours d'années d'enseignements donnés à des étudiants de cursus variés : les élèves instrumentistes, compositeurs, musicologues de la classe d'acoustique musicale du Conservatoire national supérieur de musique de Paris, auxquels se joignaient aussi des ethnomusicologues et de futurs preneurs de son ; les étudiants en cinéma de la Fémis, ceux du master scientifique ATIAM (Acoustique, traitement du signal, informatique, appliqués à la musique) de l'université Paris VI et les ingénieurs de la semaine Athens « Musique, science, histoire » de l'École des mines Paris-Tech.

## Un livre à écouter

L'écoute devrait, le plus souvent, précéder la découverte des analyses visuelles et de leurs commentaires. Pour aplanir l'obstacle qui persiste entre les supports de l'écrit et ceux du sonore, deux solutions sont proposées dans le DVD-Rom d'accompagnement.

La première consiste à utiliser une version numérique du livre apparaissant à l'écran d'un ordinateur (ou d'une tablette) dans la même mise en pages, mais avec les sons intégrés, donc immédiatement accessibles sur un simple clic. Cette édition PDF multimédia de l'ouvrage est proposée en deux versions : l'une avec sons au format MP3, l'autre avec sons au format WAV.

La deuxième solution s'adresse à ceux qui préfèrent la lecture sur papier. Nous leur offrons en complément du livre une série de « livrets sons », un par chapitre, contenant la collection des exemples sonores à importer dans un lecteur mobile (Smartphone ou tablette). Ces fichiers au format ePub3, réalisés par Guillaume Pellerin de la société Parisson, sont compatibles avec les plateformes Apple iOS et Android. Ils comprennent une page par son, avec la légende du son, une barre de lecture audio et une vignette rappelant la figure associée. Vous pouvez également accéder direc-

tement à ces livrets sons en scannant le QR code ci-contre à l'aide de votre Smartphone ou de votre tablette, ou via l'URL : [www.editions-eyrolles.com/go/castellengo](http://www.editions-eyrolles.com/go/castellengo).



Toutes les indications sur l'usage de ces documents sonores sont fournies dans l'annexe « Contenu du DVD-Rom d'accompagnement », en fin d'ouvrage.

**Quelle modalité d'écoute adopter ?** L'écoute des sons sortant directement d'un Smartphone, d'une tablette ou d'un ordinateur est une écoute de contrôle de qualité très réduite, très limitée vers les basses fréquences. Elle est à prohiber.

L'écoute au casque, très répandue aujourd'hui, a le double avantage d'être discrète et d'isoler du bruit environnant. Elle convient lorsque le casque est de bonne qualité, mais nous recommandons de l'éviter pour une première approche, car elle nous prive d'une fonction essentielle, l'exploration du champ sonore par de petits mouvements de tête pour apprécier les différences entre les sons arrivant aux deux oreilles, ressource importante pour la discrimination qualitative des sons.

L'idéal est donc de pouvoir écouter fréquemment sur une bonne chaîne de reproduction, si possible en compagnie d'auditeurs amis impliqués dans des pratiques sonores différentes afin de découvrir, au cours d'échanges réciproques, l'étonnante richesse des écoutes individuelles.



À *Émile Leipp*,  
créateur du LAM  
et à *Abraham Moles*,  
passeur d'idées

À *Marie-José*,  
par qui tout est arrivé

## Remerciements

Un tel ouvrage n'aurait pu voir le jour sans l'engagement de chercheurs passionnés par le projet qui ont, pendant près de dix années, tenu un séminaire de suivi de la rédaction : Denis Mercier, créateur sonore cinéma et musique, directeur de l'ouvrage collectif *Le livre des techniques du son*, initiateur et aiguilleur du projet ; Pascal Gaillard, musicologue, chercheur en perception auditive et maître de conférences à l'université de Toulouse ; Charles Besnainou, luthier et ingénieur de recherche en acoustique instrumentale au LAM ; Marie-Cécile Barras, musicologue, maître de conférences à l'université de Bordeaux ; Thierry Maniguet, musicologue, conservateur au musée de la Musique ; Hugues Genevois, chercheur en nouvelles technologies et création musicale, ingénieur de recherche au ministère de la Culture, responsable de l'équipe LAM ; Adrien Mamou-Mani, concepteur d'instruments augmentés, chercheur à l'Ircam et professeur d'acoustique musicale au Conservatoire national supérieur de Paris. Tous ont contribué – par leurs compétences complémentaires – à l'élaboration de l'ouvrage en débattant des idées proposées et en fournissant un soutien stimulant jusqu'à l'aboutissement de ce livre. Ma dette envers eux est immense. S'y ajoute celle que j'ai envers Danièle Dubois dont les idées ont irrigué et conforté mon approche intuitive de l'écoute en m'initiant à la catégorisation perceptive.

La collection des sons, qui fait la richesse de cet ouvrage, provient en grande partie des archives du LAM<sup>1</sup> constituées au cours des recherches développées avec Émile Leipp. Je remercie très sincèrement les nombreux instrumentistes, chanteurs, ethnomusicologues qui m'ont autorisée à reproduire leurs exemples sonores.

---

1. En cours de numérisation, les archives sonores du LAM sont consultables sur le site <http://telemeta.lam.jussieu.fr/>

D'autres proviennent de missions effectuées pour le ministère de la Culture (orgues, cloches), de séminaires et de travaux de thèse. Ma reconnaissance va également aux personnes et aux institutions qui m'ont accordé l'autorisation de reproduire les tests auditifs et les sons paradoxaux propres à questionner l'écoute musicale, ainsi qu'aux personnes par l'entremise desquelles certaines demandes ont pu aboutir : Johann Curtet, Laurent Daudet, Jean During, Jean Kergomard, Ted Levin, Jean-Claude Risset et Joe Wolfe. Toutes les sources sont mentionnées explicitement dans le texte des légendes des sons afférentes à chaque chapitre.

Nous avons donné la priorité aux sons les plus intéressants, parfois enregistrés dans des conditions difficiles. Vincent Mons, que nous remercions vivement, a généreusement assuré le long travail de toilettage et de montage des 422 exemples sonores.

Mes remerciements vont aussi aux nombreux « relecteurs écouteurs » mis à contribution sur diverses parties relevant de leur expertise : Pierre-Yves Asselin, Daniel Fargue, Joël Frelat, Claudia Fritz, Suzanne Fürniss, Nathalie Henrich-Bernardoni, Sylvain Lamesch, Benoît Navarret, Marc Pinardel, Jean-Dominique Polack, Laurent Quartier, Corsin Vogel.

La rédaction finale a fait l'objet d'une relecture intégrale, exigeante et attentive de la part de deux personnalités représentatives des deux domaines – science et musique – ici réunis : Jean-Sylvain Liénard et Georges Bloch. Ils m'ont fait l'amitié d'écrire chacun une préface et je les en remercie très profondément.

Enfin, pour que l'ensemble de ce travail prenne la forme d'un livre, il a fallu la complicité de Daniel Fargue et Béatrice Avakian, la confiance et l'engagement d'Éric Sulpice, directeur éditorial des Éditions Eyrolles, qui a pris le risque d'un « livre-sons » particulièrement complexe à réaliser, et la formidable implication de Françoise Barat et de toute l'équipe des Éditions Eyrolles. Ce projet a bénéficié de la disponibilité qu'offre la position de chercheur émérite au CNRS. Accueillie à l'institut Jean-Le-Rond-d'Alembert (UPMC-Sorbonne Universités), j'ai pu poursuivre le développement de mon travail au sein du LAM – équipe issue du Laboratoire d'acoustique musicale créé par Émile Leipp en 1963 –, lieu où s'opère une alchimie originale entre musiciens, scientifiques, luthiers et chercheurs en sciences humaines.

# Table des matières

<b>INTRODUCTION AU MONDE DES SONS</b> .....	1
Les sons de l'introduction .....	6
<b>CHAPITRE 1 – DES VIBRATIONS AUX SONS DE LA MUSIQUE</b> .....	7
1. À l'origine du son : le mouvement .....	7
2. La production et la propagation des sons .....	7
2.1. En bref .....	7
2.2. L'excitation : impulsion ou entretien .....	9
2.3. La notion d'onde .....	12
2.4. Les modes vibratoires (transition ondes-modes) .....	14
2.5. Des vibrations de la structure au son rayonné .....	17
2.6. La réception, la saisie du son, les transformations de la vibration .....	18
2.7. Définitions utiles .....	19
3. La forme temporelle des vibrations .....	19
3.1. L'inscription des vibrations .....	19
3.2. La composition des vibrations .....	20
3.3. Du mouvement à l'onde sonore .....	20
4. L'analyse auditive des composantes d'un son : la série harmonique .....	21
4.1. L'analyse auditive par filtrage .....	21
4.2. Le verre percuté et le verre frotté .....	21
4.3. La série harmonique .....	22
4.4. Les intervalles de la série harmonique .....	22
5. Vocabulaire : de la musique à l'acoustique et inversement .....	24
5.1. Les divers types de sons .....	24
5.2. Les termes à connaître : harmoniques, partiels, fondamental .....	24
6. Les mélodies spectrales et les mélodies de partiels successifs : exemples musicaux .....	26
6.1. Les mélodies spectrales : sélection d'harmoniques par résonance buccale .....	26
6.2. Les mélodies produites avec les partiels d'un tuyau ou d'une corde .....	28
7. Les sons du chapitre 1 .....	30
7.1. Types d'excitation et modes vibratoires .....	30
7.2. Analyses auditives des composantes d'un son .....	31
7.3. Exemples de synthèse additive numérique d'un son périodique .....	31
7.4. Partiels et harmoniques .....	31
7.5. Mélodies d'harmoniques : exemples musicaux .....	32
7.6. Mélodies de partiels (tube ou corde) .....	32
7.7. Instruments à cordes fonctionnant sur la suite des partiels .....	32

<b>CHAPITRE 2 – LA REPRÉSENTATION DES SONS</b> .....	33
1. Les analyses acoustiques et l'écoute.....	33
1.1. L'inscription des ondes sonores.....	33
1.2. La représentation des sons.....	34
1.3. Les étapes d'une analyse.....	35
2. Première exploration : une « mise en bouche » .....	37
3. Les paramètres du signal sonore.....	39
3.1. La temporalité et l'analyse des vibrations sonores .....	39
3.2. La mesure de la fréquence : un problème difficile.....	40
3.3. La transformée de Fourier à court terme et la dualité temps/fréquence.....	43
3.4. L'amplitude globale : l'enveloppe temporelle, la dynamique.....	47
3.5. Les spectres : spectres à court terme et spectres moyennés .....	49
3.6. Le traitement du signal et la resynthèse .....	51
3.7. La représentation des intervalles musicaux.....	52
4. Quelques exemples d'analyses .....	56
4.1. Un cas d'école : sonagrammes, formes d'ondes et spectres de sons électroniques .....	56
4.2. L'anatomie d'un son de steel-drum .....	58
4.3. Le verre percuté et l'entretien des deux premiers modes propres .....	62
4.4. L'octavation et le quintoiement .....	63
4.5. La séquence complète des partiels d'une flûte et d'une clarinette .....	64
4.6. Une mélodie jouée à la tilinca roumaine .....	65
4.7. Les mélodies d'harmoniques et les mélodies de partiels.....	66
4.8. L'analyse de la voix humaine : formants des voyelles ou intonation ?.....	67
4.9. L'analyse et l'interprétation perceptive : un exemple trompeur .....	68
4.10. La voix chantée et le piano : comparaison de sons de hauteur fixe et de sons vibrés .....	69
4.11. Nuit en Vendée .....	69
4.12. Une séquence sonore de percussions de hauteur indéterminée .....	70
4.13. L'analyse d'un son de hautbois avec trois logiciels différents : Wavesurfer, Praat et Audiosculpt .....	71
5. En guise de conclusion.....	73
6. Les sons du chapitre 2.....	76
 <b>CHAPITRE 3 – LE SYSTÈME AUDITIF HUMAIN</b> .....	 79
1. Description sommaire de l'organe auditif.....	79
1.1. Introduction .....	79
1.2. Schéma général du système auditif .....	79
1.3. Les trois parties de l'oreille .....	82
1.4. Les voies nerveuses : de la cochlée au cortex auditif.....	89
1.5. Le codage de l'information sensorielle .....	91
2. Les caractéristiques psychophysiques de l'oreille humaine .....	95
2.1. Les seuils absolus.....	95
2.2. L'oreille considérée comme un banc de filtres : la notion de bandes critiques .....	98
2.3. La sensibilité aux variations d'amplitude, de fréquence et de durée.....	101
2.4. Réponse à l'accroissement d'une stimulation : la loi de Fechner-Weber.....	103
2.5. Les seuils différentiels d'intensité et de fréquence .....	104

2.6.	La sensation d'intensité des sons purs.....	108
2.7.	La sensation de hauteur des sons purs.....	110
2.8.	La sensation d'intensité des sons complexes.....	113
2.9.	La sensation de hauteur des sons complexes.....	113
3.	Observations sur quelques phénomènes temporels .....	118
3.1.	Du successif au continu : une frontière physiologique.....	118
3.2.	Les variations périodiques de sons de hauteur définie : modulations et battements .....	120
3.3.	La notion de discrimination temporelle.....	125
3.4.	Résolution temporelle ou intégration temporelle ?.....	126
4.	La localisation des sons et la perception de l'espace .....	127
4.1.	La localisation et la latéralisation auditive .....	127
4.2.	La localisation dans le plan horizontal.....	129
4.3.	La localisation dans le plan vertical : plan sagittal (ou médian) .....	131
4.4.	La prise en compte des pavillons.....	132
4.5.	L'effet de précédence ou loi du premier front d'onde .....	132
4.6.	L'estimation de la distance .....	132
4.7.	La localisation en situation réelle.....	132
5.	Les sons du chapitre 3.....	135
5.1.	Simulation de surdités : filtrage de la voix parlée (voix féminine).....	135
5.2.	Bandes critiques, asymétrie du masquage (écoute au casque conseillé) ...	135
5.3.	Seuils différentiels.....	136
5.4.	Finesse de discrimination auditive .....	136
5.5.	Variation de la sensibilité auditive avec la fréquence .....	136
5.6.	Durée du son et sensation de hauteur tonale .....	136
5.7.	Perception mélodique dans l'aigu et plafond du codage temporel.....	136
5.8.	Plusieurs exemples de sons dont les composantes sont équidistantes de 250 Hz.....	137
5.9.	Discrimination des harmoniques.....	137
5.10.	Du discontinu au continu.....	137
5.11.	Modulations et battements.....	137
6.	Réponses aux tests.....	138

#### CHAPITRE 4 – UNE APPROCHE DE LA PERCEPTION SONORE : FORMES ET CATÉGORISATION .....

		139
1.	La perception.....	139
1.1.	Préambule.....	139
1.2.	Qu'est-ce que percevoir ?.....	140
2.	À l'écoute du monde sonore environnant.....	143
2.1.	L'audition « sens d'alerte » et l'écoute choisie .....	143
2.2.	Deux modalités perceptives distinctes : identifier les sons ou les qualifier	144
2.3.	L'acte d'écoute : sensation, mémoire, anticipation .....	146
2.4.	L'étude « écologique » de la perception sonore et le paradoxe de la complexité .....	149
3.	La notion de forme sonore spectrotemporelle : sources et séquences .....	152
3.1.	Qu'est-ce qu'une forme ? .....	152
3.2.	Les formes fortes et les formes faibles .....	153
3.3.	Peut-on parler de formes sonores ? Expérience de reconnaissance de sons très brefs .....	154

3.4.	Typologie acoustique des formes sonores.....	157
3.5.	Les formes sonores : primauté de la dimension temporelle .....	158
3.6.	Les formes et le matériau sonore : deux niveaux de structuration temporelle des formes acoustiques.....	159
3.7.	Les formes sonores et la variabilité .....	166
3.8.	Les rapports entre la forme et le fond .....	169
3.9.	La musique et la théorie de la forme : l'organisation perceptive .....	173
3.10.	Les ambiguïtés d'écoute et les illusions .....	180
3.11.	La transformation d'une forme dans une autre : le morphing .....	180
4.	La catégorisation perceptive des sons et des séquences .....	182
4.1.	La notion de catégorie .....	182
4.2.	La catégorisation prototypique : similarités, niveau de base et typicalité ...	183
4.3.	La catégorisation et la perception sonore.....	185
4.4.	La catégorisation libre associée aux verbalisations .....	191
4.5.	La catégorisation des sons de la langue et de la musique.....	191
4.6.	Quelques réflexions sur la diversité des écoutes musicales.....	195
5.	Conclusions .....	198
6.	Documentation sonore.....	201
7.	Les sons du chapitre 4 .....	202
7.1.	Expériences d'écoute.....	202
7.2.	Formes sonores (sources).....	202
7.3.	Formes sonores : séquences.....	203
7.4.	Formes et flux sonores : groupements et fissions.....	203
7.5.	Ségrégations (spectrale, spatiale) .....	204
7.6.	Anamorphoses sonores .....	205
7.7.	Catégorisation (voyelle, timbre).....	205
7.8.	Formes et musiques.....	205

**CHAPITRE 5 – PERCEPTION DES QUALITÉS SONORES : L'INTENSITÉ.....** 207

1.	Introduction.....	207
2.	L'intensité perçue et la zone de sensibilité de l'oreille humaine .....	208
2.1.	Le rôle de la tessiture .....	208
2.2.	Les formants présents dans la zone 3 000 Hz .....	209
3.	La perception de l'intensité et l'enrichissement spectral .....	210
3.1.	Le crescendo musical.....	210
3.2.	Les sourdines, l'effet d'éloignement et d'écho .....	213
3.3.	Le problème des sons graves .....	213
4.	La dynamique des instruments de l'orchestre .....	214
4.1.	La dynamique globale.....	214
4.2.	Les variations de dynamique par la registration .....	216
5.	Jouer fort, jouer doux : le niveau sonore n'est pas seul en cause.....	217
5.1.	Les transformations temporelles et spectrales.....	217
5.2.	L'estimation de l'intensité et la connaissance de la source .....	218
5.3.	La perception d'intensité en contexte temporel et le rôle des silences.....	220
6.	Les nuances d'intensité en musique .....	221
7.	L'émergence par contraste de forme .....	223
7.1.	Les signaux d'avertissement.....	223
7.2.	La notion d'émergence en musique .....	224

8. Conclusion.....	226
9. Les sons du chapitre 5.....	227
9.1. Intensité perçue et spectre .....	227
9.2. Crescendo musical et changement spectral.....	227

## CHAPITRE 6 – PERCEPTION DES QUALITÉS SONORES : LA HAUTEUR DES SONS ISOLÉS .....

1. Préliminaires .....	229
1.1. Le paramètre « hauteur » dans la musique occidentale .....	229
1.2. La perception de la hauteur sonore : trois expériences introductives .....	230
1.3. Bilan des trois expériences : la perception de hauteur et la structure acoustique des sons .....	233
1.4. La dimension cognitive de la hauteur tonale : expérience de comparaison voix-sifflet .....	235
2. La hauteur des sons périodiques .....	237
2.1. Introduction : la singularité des sons purs.....	237
2.2. Du grave à l'aigu : les bornes de la perception de la hauteur tonale et la tessiture des instruments de musique .....	237
2.3. La hauteur tonale et le filtrage du fondamental .....	238
2.4. Les liens entre le contenu spectral et la hauteur tonale perçue .....	239
2.5. La hauteur tonale et la hauteur spectrale : le contrebasson.....	240
2.6. Les conflits entre hauteur tonale et hauteur spectrale : quelques sons paradoxaux.....	242
2.7. La voix humaine : de la mélodie spectrale au chant harmonique .....	244
3. La hauteur des sons apériodiques .....	251
3.1. Introduction .....	251
3.2. Un cas particulier : la quasi-périodicité des sons de piano .....	252
3.3. La hauteur due à une composante dominante : le diapason à fourche et le marimba .....	254
3.4. Le modèle harmonique : cloches et timbale.....	255
3.5. La hauteur des sons apériodiques successifs.....	260
4. Les sons périodiques modulés : vibratos et trilles.....	265
4.1. Introduction : les instabilités de fréquence des sons réels.....	265
4.2. Le vibrato musical : une modulation complexe.....	266
4.3. Le vibrato de fréquence et la perception de la hauteur .....	268
4.4. Du vibrato au trille : le rôle du contexte musical .....	272
4.5. À propos des ornements.....	274
5. Bilan.....	276
5.1. La hauteur spectrale et la hauteur tonale.....	276
5.2. La perception de la hauteur, la facture instrumentale et les modes vibratoires.....	278
5.3. Perception de la hauteur et mesure acoustique .....	279
5.4. La hauteur comme qualité de sons connus et catégorisés .....	279
6. Les sons du chapitre 6.....	280
6.1. Trois expériences introductives.....	280
6.2. Sons périodiques.....	281
6.3. Sons apériodiques .....	283
6.4. Instabilités, vibrato, trille .....	285

<b>CHAPITRE 7 – LA QUESTION DU TIMBRE</b> .....	287
1. La musique et le matériau sonore .....	287
1.1. Le timbre, la musique et l’acoustique.....	287
1.2. Les définitions acoustiques du timbre : le timbre et son double .....	288
1.3. Les deux écoutes du timbre : le timbre identitaire et le timbre qualitatif.....	290
1.4. Le timbre, la musique et ses instruments.....	291
1.5. Les nouvelles écritures orchestrales .....	292
1.6. Les nouvelles machines sonores.....	293
1.7. Les écoutes du matériau sonore : Pierre Schaeffer et les musiques électroacoustiques .....	294
1.8. La synthèse sonore, pierre de touche de la perception .....	295
1.9. Du timbre au « son pour lui-même » : vers une dissolution du concept de timbre ?.....	296
2. Le timbre identitaire des sources instrumentales .....	297
2.1. La typologie acoustique des formes sonores de base .....	297
2.2. Typologie des sources sonores impulsionnelles (percussions) .....	300
2.3. Les sources sonores de hauteur définie.....	308
2.4. Du son isolé à l’instrument : la variabilité de la forme identitaire avec la tessiture .....	322
2.5. L’instrument de musique : permanence-variation.....	332
2.6. Le timbre identitaire et la musique : cohérence et incohérence du timbre...	338
2.7. Un bilan : typologie instrumentale et timbre causal.....	342
3. Le timbre et la catégorisation perceptive.....	346
3.1. Les catégories instrumentales du timbre identitaire.....	346
3.2. Caractériser le timbre qualitatif : les mots du timbre.....	351
3.3. Les attributs perceptifs du timbre : des sons synthétiques aux sons instrumentaux .....	356
4. Le timbre et les pratiques du son.....	366
4.1. Les qualités du son : une écoute choisie.....	366
4.2. La diversité des écoutes dans les pratiques de la qualité sonore.....	367
4.3. Une méthode d’étude en sémioacoustique .....	375
4.4. Les problèmes posés par l’évaluation qualitative des instruments de musique et de la voix.....	379
4.5. Les étapes de la construction acoustique du timbre.....	382
5. Conclusions .....	383
6. Les sons du chapitre 7.....	386
 <b>CHAPITRE 8 – SYSTÈMES D’INTERVALLES ET ACCORDAGE</b> .....	 391
1. La notion d’intervalle .....	391
1.1. Données perceptives .....	391
1.2. Données musicologiques .....	392
1.3. Les échelles mélodiques de sélection d’harmoniques : le problème de l’harmonique 7 .....	398
1.4. L’estimation d’un intervalle par l’harmonique commun à deux sons .....	401
1.5. Entre mesure et perception : les intervalles mélodiques et la musique.....	408
1.6. En conclusion .....	410
2. Sons stables simultanés : phénomènes physiques.....	411
2.1. Les battements entre deux sons voisins de l’unisson.....	411

2.2.	Les battements d'intervalles quelconques .....	413
2.3.	Des battements aux sons différentiels : « les sons ont une ombre ».....	415
2.4.	La production de hauteurs complexes avec des instruments à sons entretenus .....	417
2.5.	Les hauteurs d'un son complexe : des notes ? un accord ? un timbre ?.....	420
3.	L'accordage des instruments polyphoniques de hauteur fixe .....	420
3.1.	Les bases acoustiques de l'accordage.....	421
3.2.	La réalisation pratique des systèmes d'accord d'instruments de hauteur fixe.....	425
3.3.	Accordage et instrument : de la théorie à la réalisation pratique .....	432
4.	Le diapason et l'oreille dite absolue .....	435
5.	Les sons du chapitre 8.....	439
5.1.	Les intervalles entre sons successifs (mélodie) .....	439
5.2.	Les intervalles entre sons simultanés.....	439
5.3.	Accordage des instruments polyphoniques à sons fixes .....	440
<b>CHAPITRE 9 – VOIX ET PERCEPTION .....</b>		<b>443</b>
1.	La voix humaine : un instrument très particulier .....	443
1.1.	Une source acoustique polymorphe.....	443
1.2.	Données élémentaires sur l'instrument vocal.....	445
1.3.	La parole et les articulateurs .....	451
1.4.	Les cavités de résonance : voyelles et timbre .....	451
2.	La voix chantée et les cavités de résonance .....	456
2.1.	Interactions d'un son harmonique avec un résonateur.....	456
2.2.	Relations entre la tessiture des voix chantées et les zones spectrales des formants vocaliques .....	457
2.3.	Voyelles et chant lyrique.....	458
3.	Voyelles et chants harmoniques : formants F1 et F2 .....	462
3.1.	Les mélodies harmoniques du chant diphonique .....	462
3.2.	Les rapports de fréquence entre formants et fondamentale laryngée .....	463
3.3.	Chant de F1 et technique vocale du period-doubling .....	464
3.4.	Exemples de musique harmonique avec accord d'octave entre F1 et F2 .....	465
3.5.	La quintina des chanteurs sardes : une expérience perceptive étonnante...	467
3.6.	Conclusion.....	470
4.	Les sons du chapitre 9.....	471
<b>ANNEXES</b>		
<b>ANNEXE A – CONVENTIONS DE NOTATION MUSICALE .....</b>		<b>477</b>
<b>ANNEXE B – INTERVALLES MUSICAUX .....</b>		<b>479</b>
1.	Tableau des intervalles et de leurs mesures.....	479
2.	Calcul des commas.....	481
2.1.	Calcul du comma syntonique .....	481
2.2.	Calcul du comma pythagoricien.....	481
2.3.	Calcul du comma enharmonique.....	481

3. Divers.....	482
3.1. Mesure de la fréquence d'un son avec un accordeur.....	482
3.2. Trouver la fréquence d'un son dont on connaît l'intervalle par rapport à un autre.....	482
4. Fréquences des notes du tempérament égal calculées pour l'octave 3.....	483
<b>ANNEXE C – PRATIQUE DU LECTEUR MUSICIEN.....</b>	<b>485</b>
1. Fréquence, période, célérité, longueur d'onde.....	485
2. Correspondances note-fréquence-période-longueur d'onde.....	485
3. Série harmonique.....	486
4. Un exemple pratique : calculer la fréquence de résonance d'une bouteille.....	486
<b>ANNEXE D – TEXTES.....</b>	<b>487</b>
1. Analyse de l'écoute d'une mélodie par Edmund Husserl.....	487
2. L'illusion perceptive du trille.....	487
<b>ANNEXE E – VISUALISATION DES PHÉNOMÈNES VIBRATOIRES.....</b>	<b>489</b>
1. À propos des animations visibles en ligne.....	489
1.1. sDR : site de Dan Russel.....	489
1.2. sPF : site de Paul Falstad.....	490
1.3. sJW : site de Joe Wolfe.....	490
1.4. sWR : site de Wolfgang et Rousseau.....	491
2. Fibroscopie des cordes vocales pendant le chant.....	491
<b>ANNEXE F – BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>493</b>
1. Matériel audiovisuel.....	493
2. Bases de données.....	493
3. Livres – Périodiques – Articles – Comptes rendus de congrès – Thèses – Rapports.....	494
4. Internet : sites et pages personnelles.....	512
5. Logiciels.....	513
<b>ANNEXE G – GLOSSAIRE.....</b>	<b>515</b>
<b>ANNEXE H – CONTENU DU DVD-ROM D'ACCOMPAGNEMENT.....</b>	<b>531</b>
<b>INDEX.....</b>	<b>535</b>
<b>INDEX DES NOMS PROPRES.....</b>	<b>539</b>

# INTRODUCTION AU MONDE DES SONS

*S'il vous plaît... dessine-moi un son !*

Nous n'avons jamais été plongés dans une telle profusion sonore. Pourtant le monde des sons demeure, pour la plupart des auditeurs, un monde mystérieux. Nous ne pouvons ni voir ni toucher ces ondes sonores qui s'entrecroisent et nous enveloppent. Même prisonniers des galettes de cire et des CD numériques, les sons échappent à l'observation courante, car leur nature vibratoire est infinitésimale. La durée d'une oscillation est trop brève pour être saisissable à l'œil nu (quelques millisecondes) et l'amplitude vibratoire du mouvement qui l'a produit extrêmement faible (de l'ordre du micron).

Que retient-on d'un son que l'on vient d'entendre ? Ce que l'on a *compris* d'une parole, ce qu'on a *reconnu* d'une musique, mais pas le son lui-même. Il faut le capter, le fixer, l'écouter et le réécouter, analyser les vibrations pour pénétrer dans la richesse et la complexité de ce que nous entendons quotidiennement et que nous croyons si bien connaître. Lorsqu'enfin nous accédons à une transposition visuelle, les images saisies sur l'écran nous étonnent car elles posent souvent plus de questions qu'elles n'en résolvent. Où sont les *notes* que l'on entend si clairement ? Pourquoi la même mélodie donne-t-elle des images si différentes lorsqu'on change d'instrument ? En quoi consiste le timbre du violon qui nous est si familier et en quoi diffère-t-il de celui de la flûte ? Bien d'autres questions surgissent sur la justesse de jeu, sur les qualités comparées des sons et en particulier sur l'incidence de la salle d'écoute.

Sans prétendre répondre à toutes les questions que se posent les auditeurs, nous proposons d'offrir quelques clés pour entrer dans le monde de l'acoustique par le biais de l'écoute, pour nous approprier l'usage des représentations visuelles du son et, finalement, associer l'écoute à l'analyse acoustique, comme on le fait de la musique et de la parole avec leurs transcriptions écrites, en *dessinant les sons*.

Les musiciens sont les grands magiciens du son, qui est pour eux à la fois le déclencheur et le fil conducteur d'un riche imaginaire personnel. Ils passent de patientes années à maîtriser leur instrument pour produire les sons qui nous touchent. Pour entrer dans l'univers de l'acoustique musicale, ils ont sur les scientifiques l'énorme avantage d'avoir développé à la fois une bonne oreille, une bonne mémoire auditive et une grande mobilité dans les stratégies d'écoute. Ces compétences hautement spécifiques ne doivent pas éclipser celles que chacun de nous possède sans en avoir conscience — au premier plan desquelles se trouve l'écoute de la parole. Il faut aussi plusieurs années pour apprendre à repérer, dans le flot continu de la parole, les éléments signifiants du langage dont la forme acoustique varie sans cesse, et particulièrement d'un locuteur à l'autre. Comme pour la musique, il s'agit d'une pratique sonore dans laquelle nous sommes à la fois auditeurs et acteurs. Enfin, il existe un domaine sonore, celui de l'environnement, dans lequel nous faisons également preuve d'une compétence auditive insoupçonnée puisque chacun de nous est capable de reconnaître sans effort les sons qui lui parviennent quotidien-

nement, que ce soit dans la rue, dans la campagne ou dans un bistrot. Certes, la musique, la parole et les sons de l'environnement sollicitent différemment nos capacités d'écoute<sup>1</sup>, mais, du point de vue acoustique, ce sont des « signaux sonores » qui partagent les mêmes principes de production. Voici donc en guise d'introduction une petite séquence sonore à écouter, ainsi que les « images » des sons entendus sur lesquelles nous reviendrons en détail.



### Son 1 (17'')

#### Consigne d'écoute

Pour écouter le son 1, cliquez sur la barre de lecture du son dans le « livret-sons » (fichier ePub) du présent chapitre ou sur le picto du son dans la marge de la version PDF de l'ouvrage (voir annexe H, page 531, Contenu du DVD-Rom).

Cette séquence offre un concentré d'événements sonores reconnaissables dès la première audition : nous pouvons même imaginer la scène. Dans la rue, une personne répond à un appel téléphonique en élevant la voix car l'environnement dans lequel elle se trouve est particulièrement bruyant. On y perçoit des bruits de moteurs, des klaxons, des cris d'oiseaux, le passage d'une voiture de police, et pour couronner le tout un marteau-piqueur qui se met en route. Comment rendre compte visuellement des événements que nous avons tous repéré avec aisance ?

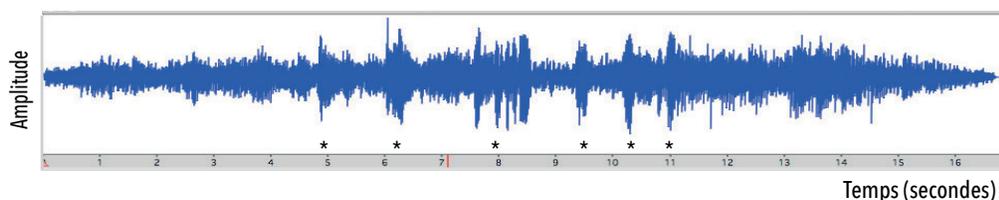


Figure 1 Tracé des variations de l'amplitude sonore en fonction du temps. Les renforcements visibles aux secondes 5 ; 6 ; 8 ; 9,5 ; 10,3 et 11, correspondent aux interventions de la voix qui est au premier plan sonore.

Le tracé de la figure 1, qui représente l'évolution de l'amplitude sonore en fonction du temps, est le plus simple à obtenir. Il convient à l'analyse de sons isolés mais ne permet pas de séparer les événements que nous entendons clairement, car les amplitudes des sons simultanés s'additionnent, notamment les vibrations du bruit de fond urbain noyant celles des autres événements. Un grossissement de l'échelle des temps (zoom) serait de peu de secours.

La représentation de type *sonagramme*<sup>2</sup>, apparue dans les années 1950, est une étape majeure de la représentation visuelle des sons, en particulier de ceux de notre environnement quotidien. Il devient possible de différencier les événements selon les zones de fréquence et d'en figurer les variations dans le temps. Sur la figure 2, le degré de noircissement indique la plus ou moins grande intensité du son. Les cris d'oiseaux aigus apparaissent sur la partie supérieure alors que les sons graves des moteurs de voiture et de mobylette occupent la partie inférieure. On repère très bien la structure rythmique régulière de la sonnerie de téléphone ainsi que les fines hachures du marteau-piqueur. Le signal de police apparaît sous forme de raies horizontales disposées en colonnes ; la parole se présente sous forme de courbes ondulantes très variables, en correspondance avec les maxima de la courbe d'amplitude.

1. Pour plus d'informations se reporter au chapitre 4.  
2. Nom commercial (francisé) d'une représentation apparue en 1946 aux États-Unis (voir Koenig, W., Dunn, H. K., & Lacy, L. Y., 1946, *The sound Spectrograph*, J.A.S.A., 18 (1), p. 19-49).

Cependant, ni les mots prononcés ni la mélodie typique de la voiture de police ne sont lisibles à première vue.

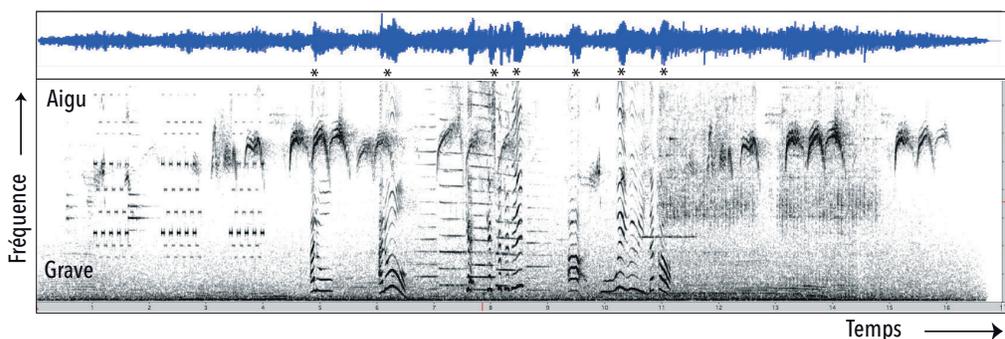


Figure 2 Représentation sonographique d'une séquence d'événements sonores captée dans l'environnement urbain.

Cette représentation a encore plus de force lorsqu'il est possible d'associer l'écoute et le déroulement temporel de l'analyse comme dans la séquence vidéo ci-dessous, incluse dans la version PDF de l'ouvrage fournie sur le DVD-Rom d'accompagnement : pour la lire, cliquez sur l'image. Là, la gamme de couleurs évolue des sons les plus faibles (noir, bleu) aux sons les plus forts (jaune, rouge).



Son 1 (17")

Vidéo

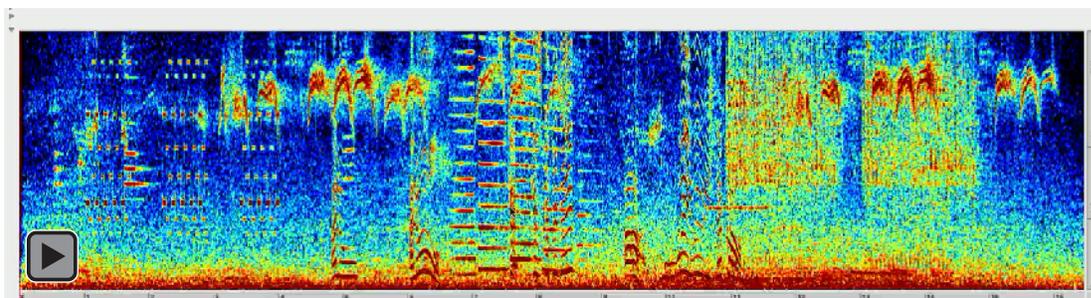


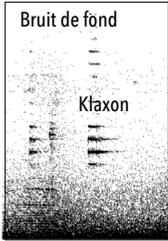
Figure 3 Séquence vidéo captée à partir de la lecture sur écran de l'analyse sonographique du Son 1. La gamme de couleurs de l'image est liée à l'intensité sonore. Le rouge figure les sons les plus intenses, le bleu pâle les sons les plus faibles. (Logiciel Audiosculpt)

Cette séquence sonore urbaine est en réalité le résultat d'un mixage des sons enregistrés séparément<sup>3</sup>. Il est donc possible de les écouter individuellement et d'effectuer les analyses des différents types de sons isolément. Le sonagramme de la figure 5 a ensuite été recomposé par la combinaison de six calques auxquels ont été attribués des couleurs arbitraires.

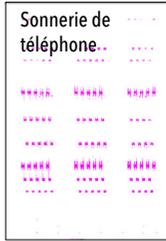
3. Séquence sonore réalisée par Corsin Vogel ; recomposition des calques colorés sur une idée de Charles Besnainou.



**Son 2 (3"')**



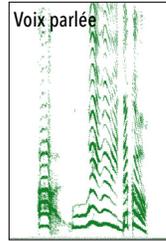
**Son 3 (4"')**



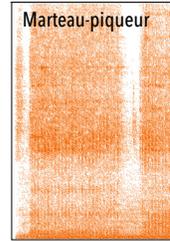
**Son 4 (4"')**



**Son 5 (3"')**



**Son 6 (4"')**



**Son 7 (4"')**

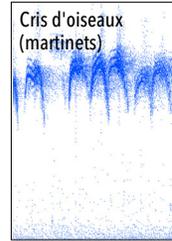


Figure 4 Analyses séparées des différents types sons. Dans le fichier PDF, cliquez sur chaque image pour entendre l'extrait sonore correspondant.

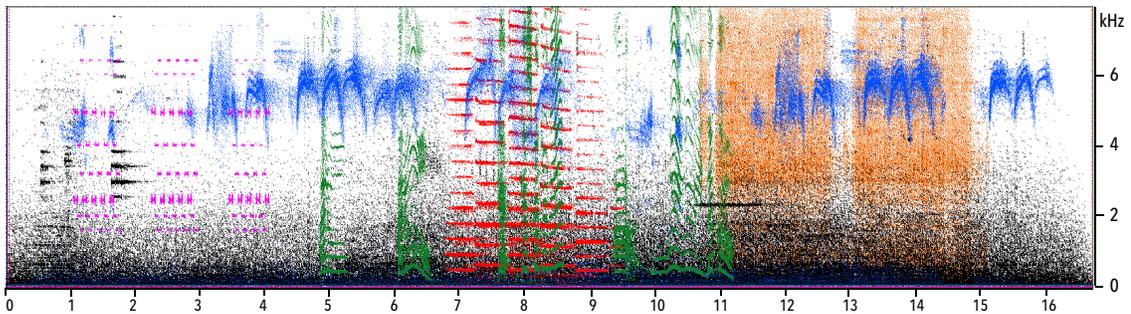


Figure 5 Représentation de type sonographique obtenue par la superposition des calques des six séquences de sons analysées séparément. La couleur de l'image est attribuée arbitrairement à un type de son (exemple : le vert pour la parole, le bleu pour la séquence d'oiseaux).



**Son 1 (17"')**

Séquence urbaine globale

Il est tout à fait remarquable que chaque type de source sonore corresponde à une forme caractéristique reconnaissable visuellement. Les recherches cognitives actuelles conduisent à penser qu'un traitement similaire s'opérerait dans notre système auditif, mais l'appréhension et le traitement de ces « formes sonores » diffère selon les situations d'écoute.

Nous souhaitons attirer l'attention du lecteur-auditeur sur les trois principales situations d'écoute (écoute des sons de l'environnement, d'une conversation ou de la musique) qu'il ne faudra pas perdre de vue par la suite, car les stratégies d'analyses à mettre en œuvre et leurs interprétations en dépendent.

L'écoute des sons de notre environnement – faculté que nous partageons avec les animaux – est celle qui nous permet de repérer et de catégoriser les sources sonores sur une base acoustique, tout en les associant aux événements vécus.

**Les sons de l'environnement : quoi ? Où ?**



**Figure 6** Écoute des sons de l'environnement : décryptage des événements sonores qui se produisent dans le monde extérieur.



**Figure 7** Écoute en situation de communication : la conversation. Écoute et « décodage » du sens porté par les sons.

Il en va différemment pour les productions sonores propres aux sociétés humaines que sont la parole et la musique. Elles ont pour support des sources sonores connues, en l'occurrence la voix humaine et les instruments dits de musique.

**La communication sonore : la parole et la musique**

L'écoute ne s'oriente donc plus sur l'origine des sons mais sur la façon dont ceux-ci sont organisés<sup>4</sup> et sur les qualités qui les caractérisent. Les traitements cognitifs diffèrent aussi selon qu'il s'agit des sons de la langue ou de ceux de la musique.

Toutefois, le substrat sonore qui sollicite l'oreille est commun aux trois situations d'écoute : c'est un signal acoustique dont la production et le comportement physique relèvent des lois de la mécanique. C'est pourquoi le chapitre 1 fournit un rappel des données utiles pour établir les relations existant entre la structure matérielle des corps et la façon dont ils sont mis en vibration, et le chapitre 2 présente les différentes représentations des sons en vue de repérer leur forme acoustique sur les analyses. De façon similaire, le chapitre 3 introduit au fonctionnement de l'oreille humaine. Sur la base de ces éléments, nous pouvons présenter dans le chapitre 4 une approche synthétique de la perception sonore fondée prioritairement sur les propriétés physiques des sons et sur les données de la psycho-acoustique, mais en l'inscrivant dans une pratique sonore située, contextualisée, de sorte que les signaux sonores prennent sens pour un auditeur acteur de son écoute.

4. En écho à la définition de John Blacking : « La musique est du son humainement organisé. »

Nous pouvons alors aborder l'étude complexe des modalités d'écoute qui jouent un rôle majeur dans nombre de musiques : l'intensité (chapitre 5), la hauteur (chapitres 6 et 8) et le timbre (chapitre 7). En dernier lieu, un bref chapitre 9 présente quelques productions remarquables de la voix humaine qui combine de façon subtile la quasi-totalité de nos capacités d'écoute.

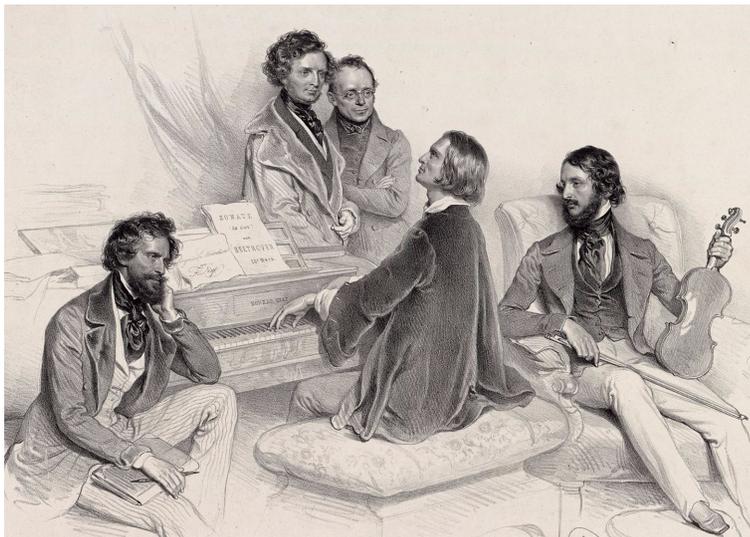


Figure 8 Écoute de la musique.

Source : Lithographie de Kriehuber, 1846, représentant Franz Liszt au piano entouré de Berlioz et Czerny (debout de gauche à droite), Kriehuber assis à gauche, Ernst à droite.

© Bnf, Paris.

L'abord de cet ouvrage ne nécessite pas de connaissances particulières en acoustique. Il s'adresse à toute personne curieuse du monde des sons et désireuse de mieux connaître la diversité des manières d'entendre. À cet effet nous offrons une grande quantité d'échantillons sonores à expérimenter individuellement, car ils sont le point de départ de notre réflexion. L'auditeur-lecteur devra surmonter de son mieux le divorce des supports matériels de l'écrit et du sonore, et s'imposer, pour une fois, de donner la priorité à l'audition sur la vision.

## Les sons de l'introduction

**Son 1** – Séquence sonore rassemblant plusieurs événements reconnaissables : bruit de fond de circulation ; parole, sonnerie de téléphone ; signal de police ; oiseaux (martinets) ; marteau piqueur. Mixage : C. Vogel, M. Castellengo. Idée du montage calque : Ch. Besnainou. [Archives LAM]

**Son 2** – Bruit de fond de circulation avec klaxon.

**Son 3** – Sonnerie de téléphone.

**Son 4** – Signal de la voiture de police.

**Son 5** – Voix de la conversation au téléphone.

**Son 6** – Marteau piqueur.

**Son 7** – Cris d'oiseaux en vol (martinets noirs).