



Cordes, vents, rayonnement, perception

Des Actes  
Colloque

Charles Besnainou  
Michèle Castellengo  
René Caussé  
Antoine Chaigne  
Christian Cuesta  
Vincent Gibiat  
Jean-Marie Heinrich  
Jean Kergomard  
Franck Laloë  
Claude Valette

Journées Pédagogiques  
D'acoustique Musicale

PARIS, 18-20 NOVEMBRE  
et 2-4 DÉCEMBRE 1988

# PERCEPTION DU SIGNAL MUSICAL

**Michèle CASTELLENGO**

chargée de recherches au CNRS  
Laboratoire d'acoustique musicale, Université Paris VI

## DONNEES PRELIMINAIRES

Les diverses représentations du signal acoustique dont nous disposons aujourd'hui permettent d'accéder à des mesures précises des grandeurs physiques : l'intensité (en dB), la fréquence (en Hz), la durée (en s, ms) la phase (en degrés). Dès lors que l'on souhaite interpréter ces indications pour faire correspondre l'analyse acoustique au jugement perceptif, plusieurs ordres de difficultés surgissent :

1. Le signal effectivement reçu par le capteur auditif dépend des *caractéristiques de sensibilité* très particulières à l'ensemble de la chaîne auditive.
2. La variation d'une seule grandeur physique correspond

le plus souvent à un effet perceptif complexe (changement de fréquence entraînant un changement d'intensité et de timbre).

3. Comme celle de tout système vivant, notre perception varie en fonction du *contexte temporel* : événements perçus dans le passé (proche ou lointain), événements à venir sur lesquels nous anticipons.

Le système auditif humain est paradoxalement un « outil » aux performances étonnantes, parfaitement adapté pour traiter rapidement et globalement l'information des signaux complexes, mais inapte aux mesures quantitatives et reproductibles.

Or la plupart des connaissances que nous avons sur la perception sonore proviennent aujourd'hui encore d'expériences classiques menées en laboratoire à l'écoute de signaux normalisés : sons purs, impulsions et bruits, tous signaux fort éloignés des sons de la musique (Zwicker, Feldtkeller [27]). La démarche consiste le plus souvent à étalonner le système auditif, comme on le ferait d'un transducteur électro-acoustique : courbe de réponse, détection de seuils, etc. Ces recherches sont complétées aujourd'hui par les enseignements issus de deux démarches : d'une part, la *synthèse sonore*, qui permet de maîtriser l'expérimentation avec des sons complexes et évolutifs ; d'autre part, les expériences de *manipulation du son dans les studios* de production musicale et d'enregistrement sonore, qui ont fait progresser la connaissance de la perception spatio-temporelle.

## LA « CHAÎNE D'ECOUTE »

Le schéma classique (fig. 1) nous permettra de rappeler quelques points. L'instrumentiste a généralement un « point d'écoute » très particulier sur son instrument (qu'on pense au violon, à la flûte, à la voix !), et c'est à partir de cette écoute qu'il règle la qualité de son jeu. Les auditeurs sont nécessairement à des endroits différents, de même que les capteurs sonores (microphones) placés pour l'enregistrement et l'analyse acoustique. Les divergences seront

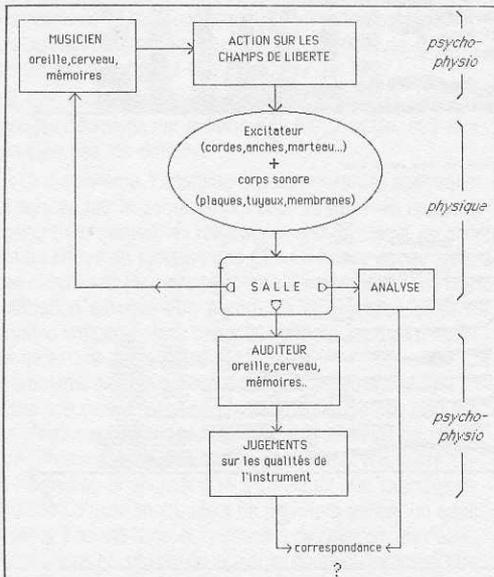


Fig. 1 — Organigramme des éléments de la chaîne d'écoute, depuis le musicien jusqu'à l'auditeur

d'autant plus marquées que le rayonnement de l'instrument est variable avec la fréquence, et que la salle est hétérogène. On conçoit les difficultés qui vont en résulter pour l'appréciation du timbre.

## PARTICULARITES DU CAPTEUR OREILLE

Rappelons brièvement les caractéristiques les plus remarquables du système auditif, en priant le lecteur de se reporter aux ouvrages cités dans l'exposé.

**Sensibilité auditive :** elle dépend de la fréquence et présente un maximum dans une zone privilégiée, schématiquement entre 2000 et 4000 Hz. La sensibilité au seuil, dont le maximum se situe aux alentours de 3000 Hz (fig. 2), décroît très rapidement dans les basses fréquences (< 50 Hz) et les hautes fréquences (> 10 000 Hz).

**La sensibilité auditive varie d'un individu à l'autre,** se modifie selon l'état de santé et s'altère irrévocablement avec l'âge (perte des aigus : de 20 000 Hz à quinze ans, à 3000 Hz à quatre-vingts ans... pour fixer les idées).

**La sensibilité différentielle de l'oreille** est remarquable. Dans les meilleures conditions on perçoit : 1/300<sup>e</sup> d'octave (soit 1 savart ou 4 cents) comme plus petit intervalle mélodique ; 0,5 dB pour les différences d'intensité ; 1 ms comme plus petit intervalle temporel entre deux sons impulsifs successifs. En audition binaurale, un décalage de 0,5 ms entre les

deux oreilles est parfaitement perçu : il permet de localiser les sources dans l'espace.

Quelles sont les conséquences de la sensibilité particulière de l'oreille aux diverses fréquences ?

1) *La seule mesure de l'intensité en dB ne peut rendre compte de l'intensité perçue puisque celle-ci dépend de la fréquence.* Il faut donc tenir compte de la composition spectrale des sons. Ainsi, lorsqu'on écoute deux sons de même fréquence fondamentale (500 Hz) et de même intensité globale (60 dB), l'un pur et l'autre possédant 5 harmoniques, le son complexe paraît beaucoup plus intense que le son pur, car une partie de l'énergie est dans la *bonne zone* de l'oreille (harmonique 4 à 2 000 Hz et harmonique 5 à 2 500 Hz).

Les musiciens exploitent — plus ou moins consciemment — ce phénomène. Lors d'un crescendo, on constate une augmentation importante de l'intensité des harmoniques situés dans la zone sensible de l'oreille (fig. 3). En *pp*, le son est quasi sinusoïdal et s'enrichit progressivement en harmoniques jusqu'au *ff*. L'analyse sur une gamme de fréquences plus large montre des harmoniques jusqu'à 14 000 Hz ! Autre exemple, un orateur, un chanteur dont la voix porte développent un formant renforçant les harmoniques situés dans cette même zone (fig. 4). Les chanteurs, les acteurs d'opéra, ainsi que certains orateurs sont capables de « placer » leur voix de sorte qu'une grande partie de l'énergie qu'ils émettent soit focalisée dans la bonne zone de l'oreille,

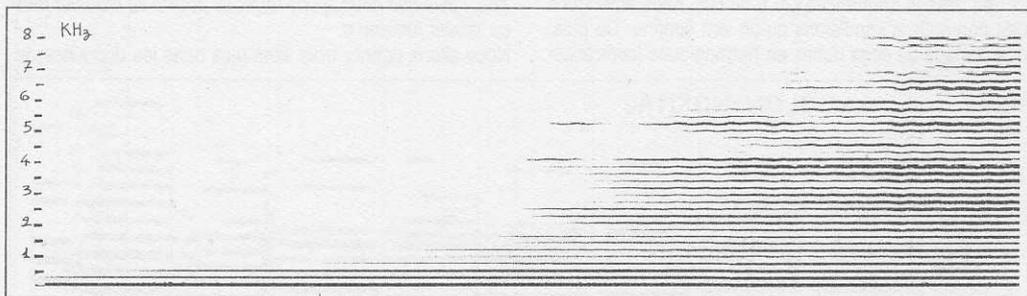


Fig. 3 — Crescendo sur une note tenue ( $Si^2$ ) jouée au saxophone alto

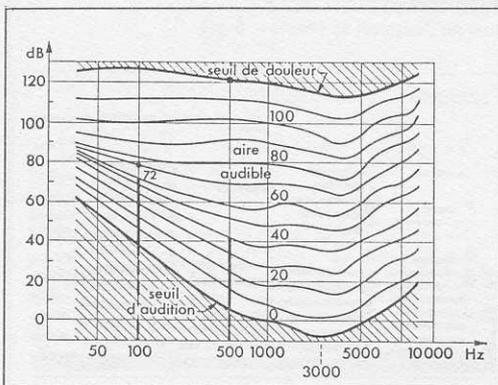


Fig. 2 — Domaine d'audibilité de l'oreille humaine (d'après Leipp [17])

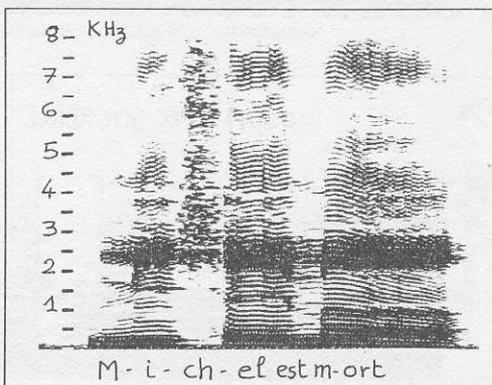


Fig. 4 — Sonagramme de la voix d'un chanteur d'opéra

ce qui leur assure une grande efficacité sur scène. L'exemple est particulièrement net sur cette figure, où l'on voit un formant fixe autour de 2 500 Hz.

A l'inverse, une sourdine de violon atténuée (filtrage par réjection) la zone 2 000-4 000 Hz (fig. 5). Cette sourdine produit d'importantes modifications spectrales, et en particulier une réjection des harmoniques entre 3 000 et 4 000 Hz, ce qui diminue fortement l'intensité subjective du violon ; d'où le nom de cet accessoire.

Comme nous l'avons annoncé au point 2 de l'introduction, les grandeurs perceptives ne sont pas indépendantes : ici, l'intensité et la sonorité sont étroitement liées.

2) *La seule mesure de la fréquence ne peut rendre compte de la perception de la hauteur. Celle-ci change selon la tessiture et dépend également du contenu spectral.*

Lors de la conférence, nous avons entendu trois sons synthétiques de même fréquence fondamentale mais de compositions harmoniques différentes : pour la plupart des auditeurs, ils ne paraissent pas avoir la même hauteur. Généralement, un son riche en harmoniques paraît plus aigu qu'un son pauvre. Ce phénomène intervient dans l'appréciation de la justesse mélodique d'un instrument à vent, par exemple lorsque certains doigtés donnent des sons de timbres très différents. Il permet également d'expliquer certains « paradoxes », comme le changement apparent de diapason des instruments jouant en coulisse ! (Leipp, Castellengo [86], p. 27).

Aux très basses fréquences (20 à 30 Hz), nous entendons plutôt une suite d'impulsions qu'un son continu. De plus, lorsqu'il s'agit de sons riches en harmoniques (contrebas-

son, clarinette basse), la hauteur spectrale due aux formants entre en conflit avec la hauteur fondamentale.

Entre 1 000 et 4 000 Hz, la sensation d'intervalle ne correspond plus aux rapports numériques des fréquences ; le fait de doubler la fréquence, en passant de 1 000 à 2 000 Hz, donne la sensation d'un intervalle plus petit que l'octave. Ce fait est pris en compte par les accordeurs de piano qui travaillent à l'oreille. Un relevé de mesures des fréquences montre que les notes de la dernière octave sont accordées avec un écart croissant par rapport à la justesse physique (fig. 6). Ici, le diagramme montre clairement la montée progressive des notes aiguës, surtout dans la dernière octave. C'est pour la même raison que les notes aiguës de la flûte, du piccolo, du saxophone soprano doivent être accordées plus haut que la référence donnée par un accordeur électronique pour paraître justes à l'oreille.

## ROLE DU CONTEXTE TEMPOREL

### Le passé

« On ne se baigne jamais deux fois dans le même fleuve », dit le proverbe. De la même façon, la sensation sonore que nous éprouvons à l'écoute d'un son, d'une séquence musicale, d'une œuvre, change d'une fois à l'autre. Tout jugement s'opère « par rapport » à une expérience antérieure. *Selon les éléments mémorisés dans le passé proche ou lointain, l'avis que nous allons formuler pourra se modifier plus ou moins fortement.*

Nous allons donner trois exemples dans les domaines de

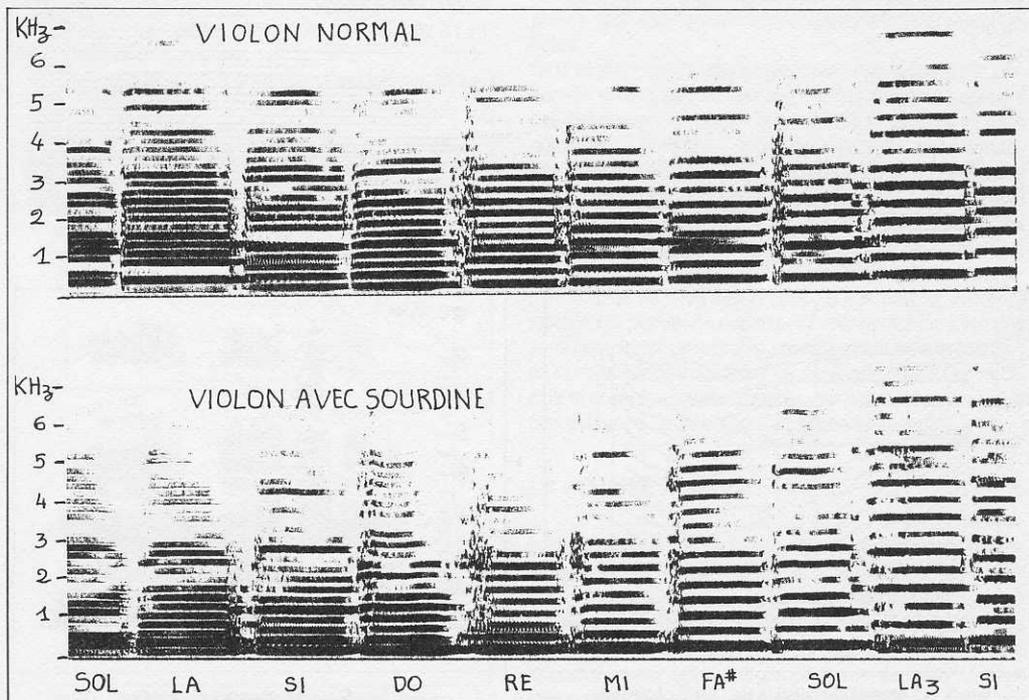


Fig. 5 — Sonagramme de deux séquences musicales jouées sur le même violon, sans puis avec sourdine

la perception de l'intensité, de la hauteur et du timbre. Demandons à un pianiste de jouer le même accord répété lentement (toutes les deux secondes) cinq fois de suite avec la succession de nuances : *P*, *mf*, *f*, *mf*, *P*. On constate que les nuances *mf* et *P* venant après la *f* ne sont pas au même niveau d'intensité que celles qui ont été réalisées dans le crescendo. Sur la figure 7, on voit nettement que la sensation d'intensité dépend du contexte temporel. Ce fait est bien connu des chefs d'orchestre. Après un *FF* « éblouissant » l'oreille, il faut exagérer les écarts de nuance.

Tout musicien distingue sans peine un intervalle de 1/2 ton de celui de 1/4 de ton. Et pourtant, dans un contexte tonal, la grandeur perçue des intervalles devient quasiment élastique et change selon le mouvement mélodique. L'exemple de la figure 8 est significatif à cet égard. Lors de l'exécution d'une mélodie au cor anglais (air du « Roi de Thulé » de *La Damnation de Faust* de Berlioz), on a mesuré l'écart des notes par rapport au tempérament égal. Le graphique met en évidence la façon dont le musicien adapte la grandeur des intervalles selon le contexte : notes sensibles, sens ascendant ou descendant de la mélodie. En position d'attraction, la note Do# est jouée beaucoup plus haute que les autres notes de la mélodie, de sorte que le triton Sol-Do# est agrandi et le demi-ton Do#-Ré très réduit. Il est évident que cet exemple est apprécié comme étant très juste musicalement.

Comme autre exemple, nous citerons l'expérience entendue au cours des journées d'étude consacrées aux cordes. Nous avons écouté la même séquence musicale jouée sur cinq guitares de sonorités très différentes. La même guitare était en position 2 après un instrument de sonorité sourde et en position 5 après un instrument brillant. Aucun des auditeurs, parmi lesquels il en était de très avertis, n'a identifié le même instrument.

Lors des tests d'écoute par paires — par exemple, son A et son B —, on sait qu'il faut toujours « croiser » les présentations, c'est-à-dire écouter AB mais aussi BA.

Nous n'avons parlé ici que du passé proche. Le passé lointain, mémoire de l'individu, conditionne ses réactions qualitatives : goût musical, style de jeu, appréciation de la justesse et de la sonorité (Leipp [17]).

### L'avenir

*L'écoute active implique que l'auditeur, à chaque instant du temps présent, parie sur les événements sonores à venir, et adapte son écoute en fonction de sa prévision. On sait maintenant que l'adaptation du récepteur a des bases physiologiques.*

Adaptation du niveau sonore à l'entrée de l'oreille : l'articulation de la chaîne des osselets qui assure la transmission des vibrations par voie solide entre le tympan et l'oreille

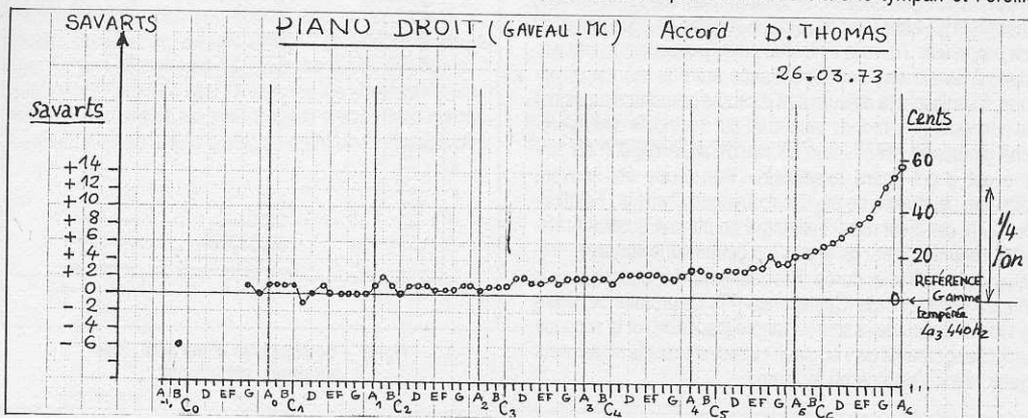


Fig. 6 — Relevé de justesse d'un piano, juste après le passage d'un bon accordeur

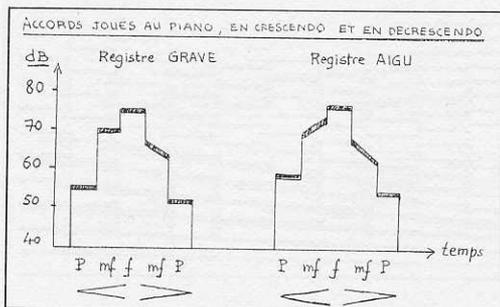


Fig. 7 — Mesure de l'intensité d'un accord joué au piano, répété avec des nuances différentes

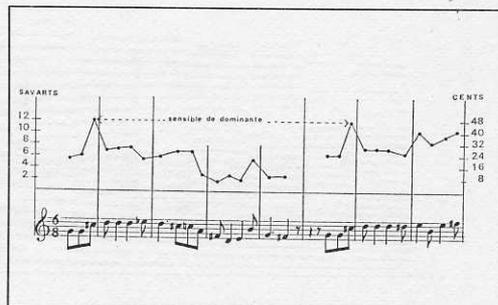


Fig. 8 — Mesure de la variation des intervalles d'une mélodie (d'après Leipp, Castellengo [86])

interne est réglée par deux muscles commandables par voie réflexe (Leipp [17]). Selon que nous prévoyons d'écouter des sons faibles ou intenses, nous pouvons ainsi adapter le niveau d'environ 30 dB. Cette adaptation mécanique s'accompagne de changements dans la perception de la sonorité.

Les récentes découvertes de la physiologie cochléaire montrent que nous sommes capables, avant l'écoute d'un son, d'activer sélectivement certaines cellules de l'oreille interne, ce qui permettrait d'expliquer l'extraordinaire finesse d'analyse auditive dont font preuve les musiciens (Aran [1]).

Pour terminer ce paragraphe, renvoyons aux ouvrages sur la théorie de l'information (Moles [20]), qui montrent l'importance de la prévisibilité dans l'attitude d'écoute : *c'est ce qui change qui est intéressant !*

### PERCEPTION DES FORMES : TIMBRE ET SONORITE

Les principes de la théorie de la forme, développés surtout dans le domaine visuel, permettent de bien comprendre la plupart des caractéristiques de la perception sonore que nous venons d'évoquer et en particulier l'interdépendance des grandeurs perceptives. Une forme n'est pas définie par l'accumulation des parties qui la constituent, mais par les rapports, de grandeur et de situation, de ces parties (Guillaume [11]). *A la notion de mesure absolue se substitue celle de proportion.* Toute la difficulté, pour l'acousticien, consiste donc à établir une correspondance entre le monde physique, fournissant la mesure des diverses grandeurs du signal acoustique, et le monde perceptif, qui nécessite une approche globale et dynamique. Le cas de la perception du timbre est à cet égard exemplaire. Son étude est souvent absente des traités de psychoacoustique (Zwicker, Feldtkeller [27]), car c'est essentiellement un attribut qualitatif relevant simultanément de toutes les dimensions sonores : fréquence, amplitude, durée. Précisons qu'il faut distinguer le timbre de la sonorité (Castellengo [7]). Le premier se réfère à l'identification de la source sonore (causalité) et la seconde aux changements de « couleur » spectrale que le signal peut subir selon l'espace ou le temps.

Les expériences de manipulation des sons et de synthèse ont montré l'importance de la composante temporelle (transitoires d'attaque, évolution dynamique) dans la caractérisation du timbre. Des bruits apparemment indésirables, comme le bruit de cavité de la caisse de la guitare, la percussion de la caisse du piano ou les bruits de sifflements à l'attaque du son de flûte, font partie intégrante de la forme acoustique mémorisée et doivent être reproduits pour une synthèse crédible. L'analyse au sonagramme d'une note jouée sur divers instruments permet de mettre en évidence les caractéristiques élémentaires du timbre comme forme spectro-temporelle. Remarquer, en particulier, les bruits de transitoire d'attaque des instruments à corde, le souffle de la flûte à bec et la composante située sous le fondamental de la guitare, qui correspond à la fréquence de résonance de la cavité aérienne de la caisse (fig. 9).

Le facteur d'instruments est concerné au plus près par les problèmes de sonorité, mais... en ce domaine, les recherches sont encore balbutiantes.

*La première difficulté provient du rayonnement* (Castellengo

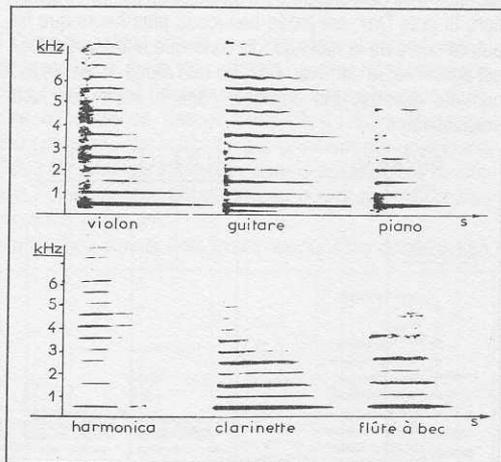


Fig. 9 — Sonagramme d'une note jouée sur divers instruments

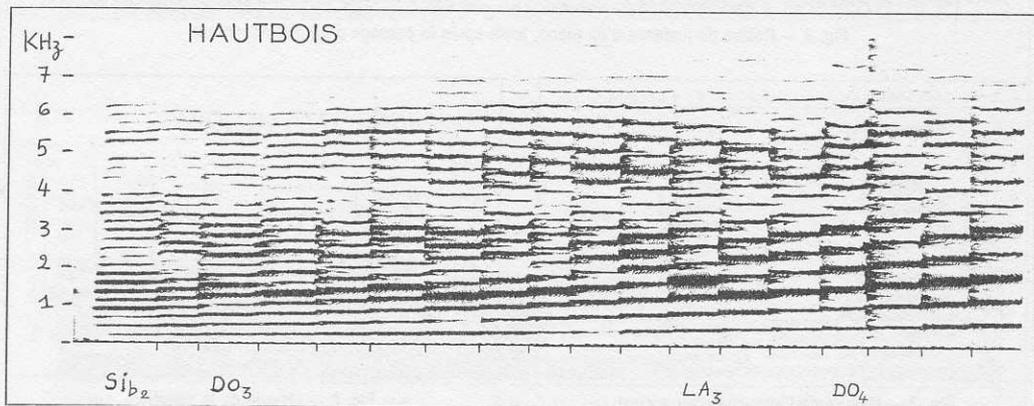


Fig. 10 — Analyse au sonagramme d'un fragment de gamme chromatique jouée sur un hautbois

[7]). Supposons que l'instrument produise une note parfaitement stable, le signal que nous recueillons avec un microphone change considérablement selon les divers points de l'espace. Où faut-il placer le microphone ? Comment rendre compte à la fois de la position d'écoute du musicien et de celle de l'auditeur ? Le problème se complique si l'inhomogénéité de la salle d'écoute est grande. On conçoit combien il est difficile de comparer deux instruments : même joueur quasiment immobile, même stricte position des microphones, etc. Paradoxalement, l'écoute naturelle est binaurculaire (!) et, de plus, nous bougeons constamment la tête. Nous sommes donc capables d'élaborer, à partir de signaux fluctuant temporellement et arrivant sur les deux oreilles, une image sonore mentale unique et cohérente, sur laquelle nous formulons un jugement de qualité.

*La deuxième difficulté est liée à la diversité de sonorité des sons d'un même instrument, donc de même timbre (Fabre [30]). De même que tous les membres d'une famille possèdent des traits communs tout en étant des individus très différents, de même l'analyse acoustique de toutes les notes d'un instrument montre une étonnante diversité de spectres, même lorsque le musicien cherche à jouer de façon la plus homogène possible. La figure 10 montre une collection de sons appartenant bien à la même famille de timbres mais présentant d'importantes variations de sonorités (comparer, par exemple, les spectres du  $Si^{b_2}$  et du  $La_3$ ). Quel degré de similarité est le plus apprécié, quelle variété introduire, comment caractériser l'inhomogénéité ? Les études en cours ne permettent pas encore de répondre à ces questions.*

Le timbre et la sonorité sont sans doute les attributs les plus difficiles à traduire et les plus fragiles perceptivement. Ils dépendent plus ou moins consciemment de l'influence des

autres sens : un instrument aux belles formes et bien décoré sonne « mieux » que son jumeau acoustique, brut de fabrication. Une flûte ou une trompette en or auront « certainement » une meilleure sonorité que leur équivalent en argent ou en laiton... Enfin, il est plus d'une salle de concert dont l'acoustique a été unanimement reconnue meilleure après qu'on ait changé les sièges pour les rendre plus confortables !

## CONCLUSIONS

---

Le travail du facteur d'instrument, science et art, se situe à l'interface entre le domaine de la physique et celui de la musique. Il s'efforce de mettre en œuvre des moyens de contrôle objectifs de la qualité des instruments pour la sonorité, la justesse, la réponse dynamique, mais en dernier ressort c'est à l'oreille que les musiciens apprécieront ces qualités. Nous avons exposé à grands traits quelques-unes des principales caractéristiques de la perception auditive pour des signaux musicaux. L'analyse de celles-ci va considérablement s'affiner dans les années qui viennent. Le développement des moyens de synthèse permettant de pratiquer des tests avec des signaux complexes, l'affinage des techniques de passation et de dépouillement de ces tests, et surtout les observations des musiciens pratiquant eux-mêmes la synthèse musicale laissent espérer d'importantes découvertes en psychoacoustique, dont pourront bénéficier les facteurs d'instruments. ■

## BIBLIOGRAPHIE

Outre les ouvrages cités dans l'exposé, voir Leipp [16].