

DAS MUSIKINSTRUMENT

Sonderdruck aus DAS MUSIKINSTRUMENT, Heft 8-1964, 13. Jahrgang, Verlag E. Bochinsky, 6 Frankfurt am Main, Klüberstr. 9

Qu'est-ce qu'un son de clarinette?

Was ist ein Klarinettenklang?

Par Prof. Dr. E. Leipp, Chef du Laboratoire d'Acoustique de la Faculté des Sciences de Paris, et Melle Castellengo

Deutsche Übersetzung von Dr. P. Meyer-Siat, Straßburg

A) Position du problème

Depuis la thèse de Voxman à l'Université d'IOWA en 1936 (bib 1), de nombreux travaux spectrographiques ont été faits sur la clarinette et des résultats intéressants ont été publiés (bib 2, 3, 4).

La méthode directe d'analyse employée autrefois consistait à explorer à l'aide d'un analyseur de fréquences une note musicale directe, tenue pendant un temps suffisant. On relevait le pourcentage d'énergie contenu dans chaque composante spectrale et l'on dessinait le spectre schématique. Cette méthode présentait de sérieux inconvénients, dus en particulier aux fluctuations spectrales très larges introduites par le musicien; pour y remédier on essaya divers systèmes de souffleries artificielles; mais on se

heurtait alors à d'autres difficultés parce que les conditions d'excitation différaient des conditions normales de jeu.

L'apparition du magnétophone simplifia énormément la question; il suffisait alors de tenir une note pendant deux ou trois secondes et de réaliser une boucle magnétique que l'on explorait ensuite à loisir, l'analyseur de fréquences couplé avec un enregistreur de niveau logarithmique permettant un relevé facile du spectre en dB/Hz. Les résultats obtenus ainsi sont d'une grande précision, mais l'expérience montre qu'ils varient d'un observateur, d'un instrument, d'un musicien à l'autre. Nous avons vérifié que le musicien modifie continuellement le spectre des notes qu'il joue normalement, pratique entièrement justifiée du point de vue de la psycho-physiologie de la percep-

tion (un son fixe devient banal et fatigant au bout de quelques millisecondes). On peut donc reprocher aux méthodes classiques d'analyse d'être insuffisantes et de se baser sur des expériences de laboratoire qui s'écarterent de la réalité musicale. C'est pourquoi nous avons repris cette question après avoir mis au point deux méthodes particulières.

B) Méthodes et résultats

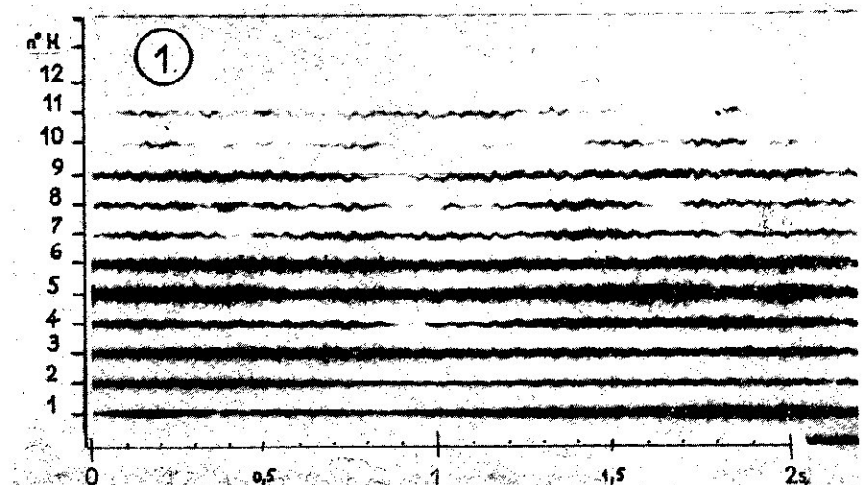
1. Méthode du Sonographe.

Nous avons utilisé le sonographe (bib 5) qui donne, dans une durée de 2,4 secondes l'évolution de la fréquence en fonction du temps. Le temps est en abscisse et la fréquence (ou le numéro des harmoniques) en ordonnée.

Fig 1

Un sonagramme de note tenue de clarinette: Le temps est en abscisse (2,4 secondes de gauche à droite), la fréquence en ordonnée (on a porté ici du bas en haut, les numéros des harmoniques, ce qui revient au même). Chaque trait horizontal représente donc un harmonique dont l'intensité est proportionnelle à la grosseur du trait. On voit ainsi que chaque harmonique fluctue dans le temps et que le spectre instantané change à chaque instant.

Sonagramm einer gehaltenen Klarinettennote: Zeitdauer in Abszisse (2,4 Sek. von links nach rechts); Frequenz als Ordinate (hier Nummern der Teiltöne). Jede Waagerechte stellt also einen Teilton dar, der umso stärker erklingt, als der Strich dicker ist. Dabei stellt man fest, daß Intensitätsverlauf jedes Teiltones variabel ist: folglich ist das Spektrum in jedem Augenblick verschieden.



Les enregistrements que l'on obtient montrent que les spectres de clarinette sont des spectres continuellement évolutifs. Considérons une note tenue de clarinette (fig. 1): le fondamental est représenté par le trait inférieur, et les harmoniques par des traits équidistants parallèles superposés au fondamental. Plus un harmonique est intense, plus le trait est gros et noir. En suivant l'un ou l'autre de ces harmoniques on voit facilement que son intensité se modifie dans le temps, et l'évolution dynamique n'est pas identique d'un harmonique à l'autre.

Exemple: le fondamental s'amplifie fortement après une seconde, l'harmonique 3 évolue en sens inverse; l'harmonique 4 disparaît au bout d'une seconde environ etc. On observe aussi un continu vibrato de hauteur, assez irrégulier; le spectre est plus riche autour d'1 seconde $\frac{1}{2}$. En bref on voit que le spectre change à chaque instant, et tous les travaux faits au laboratoire d'acoustique de la Faculté des Sciences sur ce point montrent qu'il en est ainsi de tous les instruments à anche, et même des instruments de musique traditionnels en général. Il est donc certain que la représentation classique par spectres de raies est inadéquate. Mais pour éviter les critiques que l'on pourrait formuler, (imprécision du sonographe, expériences de laboratoire) nous avons mis au point une autre méthode et utilisé un disque commercial.

2. Méthode de l'analyseur à bande étroite

Nous avons choisi le "Quatuor pour la fin du temps" de Messiaen, disque ERATO LDE 3256 A, et plus particulièrement certaines notes tenues de clarinette du 3^e mouvement (l'Abîme aux Oiseaux) où l'instrument joue en solo une même note pendant plus de 30 secondes.

Il est évident que pour rendre ces notes musicalement "intéressantes", le musicien exécutant doit y introduire des variations dynamiques et spectrales: les exemples que nous donnons ici sont particulièrement significatifs de ce point de vue. On procède de la façon suivante:

La note est envoyée directement de la tête de lecture de la platine dans un filtre à bande étroite (2% de la fréquence affichée) qui est accordé au préalable sur la fréquence fondamentale. La sortie du filtre est reliée à un enregistreur de niveau logarithmique classique.

L'enregistrement obtenu donne le plan dynamique du fondamental (évolution du niveau en dB en fonction du temps). On recommence la même opération en accordant successivement l'analyseur sur les harmoniques 2, 3, 4 etc.

Fig. 2a: Il s'agit d'un mi₄, 659 Hz, d'une durée de 30 secondes environ, joué en crescendo. Du haut en bas on a relevé l'évolution dynamique des 10 premiers harmoniques; le temps est en abscisse (une ligne verticale toutes les 5 secondes) et le niveau en décibels (un interligne = 10 dB); ligne de base = 50 dB.

On peut facilement extraire le spectre de raies à tel ou tel instant, par exemple à la 20^e seconde. Il suffit de tracer une ligne verticale passant par le point 20s du haut en bas de la figure et de relever l'intensité en dB pour chaque harmonique. Ainsi le fondamental a 85 dB, l'harmonique 2 a 68 dB, l'harmonique 3 a 60 dB etc. Il est facile de montrer ainsi que la forme (l'enveloppe) du spectre change continuellement et on vérifie qu'un harmonique donné peut varier de plus de 25 dB d'une seconde à l'autre.

Fig. 2b: Dans le même mouvement, un peu plus loin, on retrouve la même note, avec la même durée à peu près. Nous avons analysé cette note de la même manière (fig 2b) et les observations faites au sujet de la précédente restent valables. Mais en comparant les notes 2a et 2b on voit bien que l'évolution dynamique des harmoniques homologues est tout à fait différente. Autrement dit, le musicien "joue" avec le spectre et ne refait jamais deux fois de suite la même chose.

Fig. 3: Il s'agit ici d'une note ré₄, 146 Hz (note la plus grave de l'instrument) tenue dans le même mouvement pendant 14 secondes. On observe les mêmes fluctuations dynamiques, sauf pour les trois premiers harmoniques qui restent relativement constant en intensité.

A la lumière de ces résultats on peut se poser la question de l'origine de ces fluctuations, réglées au gré du musicien, mais dans les limites bien définies. Une série de travaux faits au Laboratoire d'Acoustique ont montré qu'il existait deux causes principales: — la cavité buccale (bib 6), dont le domaine d'action sur le spectre (zone formantique de la cavité buccale) s'étend de 500 à 2000 Hz environ. Ainsi, connaissant la fréquence fondamentale d'un son il est facile de préciser les harmoniques sur lesquels le musicien peut agir (harmoniques sensibles de la cavité buccale). Exemples: pour un fondamental de 659 Hz la bouche peut agir sur les harmoniques 1, 9 et 3 (respectivement 659, 1318, 1976 Hz). Pour un fondamental 146 Hz, il peut "jouer" sur les harmoniques allant de 4 à 13 (on comprend bien ainsi pourquoi dans ce cas les trois premiers harmoniques sont très stables: voir fig 3)

— l'anche. La fréquence propre d'une anche de clarinette dans les conditions d'utilisation a été mesurée sur des anches plus ou moins fortes; elle varie en gros autour de 2000 à 3500 Hz, ce qui détermine la "zone formantique de l'anche". Le musicien peut faire varier cette fréquence facilement en modifiant la force d'appui et le point de contact anche-lèvre intérieure. Comme précédemment, connaissant la fréquence du fondamental il est aisé de calculer les "harmoniques sensibles" de l'anche et on comprend pourquoi la forme spectrale varie du grave à l'aigu de l'instrument (on s'explique la différence de timbre des registres du clairon et du chalumeau). Accessoirement on voit pourquoi la théorie élémentaire selon laquelle les harmoniques pairs devraient manquer est insuffisante.

C) Conclusion

Nous avons montré que la représentation spectrale classique était inadéquate dans le cas des instruments de musique à anches (clarinette, saxophone, etc); la seule représentation significative est celle qui donnerait le "champ de liberté" du timbre pour chaque note (il faut définir les limites entre lesquelles le musicien peut faire varier le niveau de chaque harmonique dans les cas extrêmes).

On retiendra d'autre part que les phénomènes acoustiques rayonnés par les instruments de musique traditionnels sont d'une complexité et d'une variété extraordinaires, et que les fluctuations sont produites par action du musicien sur le système excitateur. Ces fluctuations sont l'essence même de la musique et la méthode d'analyse la plus efficace de phénomènes musicaux réels reste la méthode du sonographe, dont la particularité intéressante est précisément de photographier ces fluctuations et de les mettre en évidence visuellement. En acoustique instrumentale et musicale il s'agit très généralement de définir l'allure des phénomènes, les marges des champs de liberté, une trop grande précision en ce domaine étant illusoire.

1. Voxman (H) The tone quality of the clarinet. Diss. University of Iowa Library (1936)
2. Seashore (C) Psychology of Music. Mc Graw Hill, New York (1938)
3. Saunders (F. A.) Analyses of the tone of a few wind instruments. JASA vol. 18 N° 2 (1946), p. 395—401.
4. Meyer (J) Die Klangspektren von Klarinetten. DAS MUSIKINSTRUMENT, 1964, Heft 2, p. 133—138. Frankfurt a. M.
5. Leipp (E) De l'acoustique des instruments à cordes. Annales Elec. Tome 17, N° 5—6 (1962), p. 99—105.
6. Leipp (E) La cavité buccale, paramètre sensible des spectres rayonnés par les instruments à vent. Comptes-rendus ICA, p. 51, (1962) Kopenhagen.

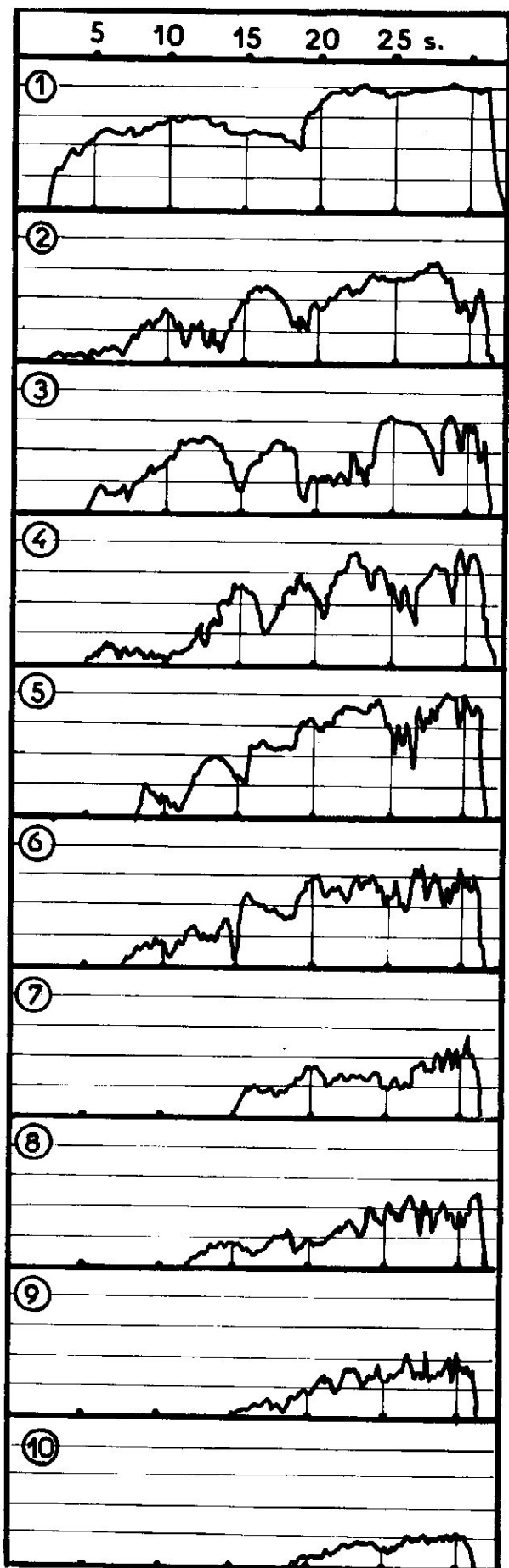
Fig. 2 Evolution dynamique de deux notes tenues de clarinette:

On a relevé, pour deux notes de clarinette, (mi₄ 659 Hz) tenues pendant 30 secondes environ, l'évolution du niveau des 10 premiers harmoniques en fonction du temps. On voit que le musicien modifie la forme du spectre à chaque instant et ne refait jamais la même chose d'une note à l'autre. Ces fluctuations sont l'essence même de la musique.

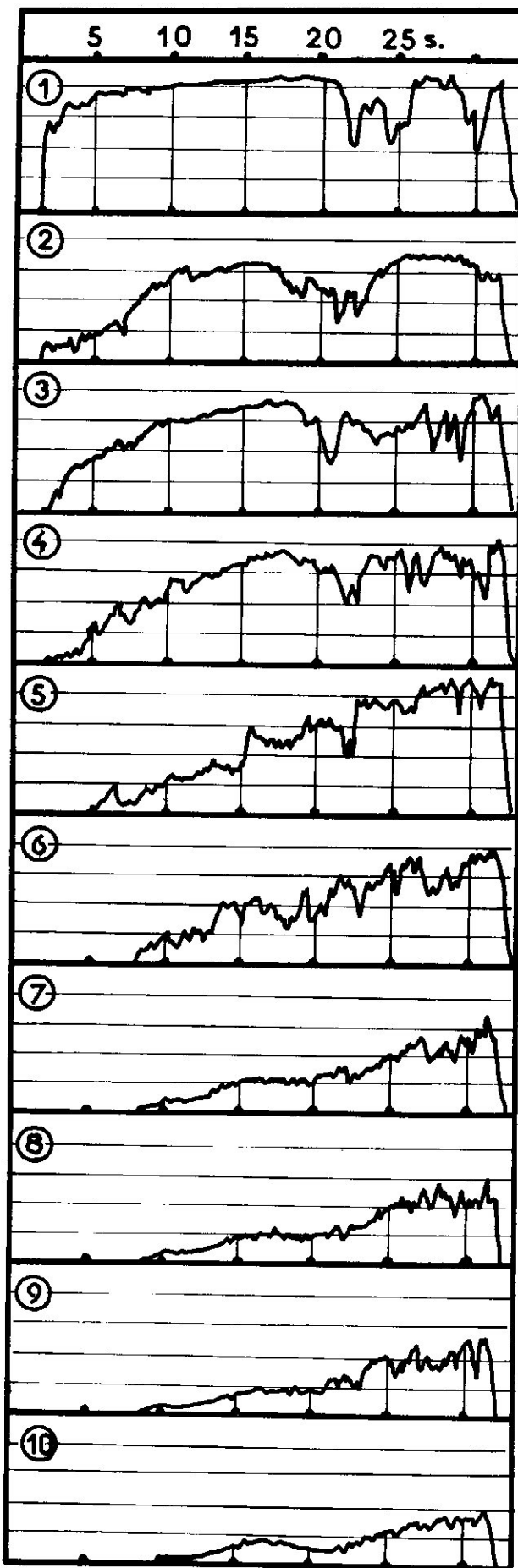
Dynamischer Verlauf zweier gehaltener Klarinettennoten:

Aufgenommen wurde der Intensitätsverlauf der 10 ersten Teiltöne zweier etwa 30 Sekunden lang gehaltener Klarinettennoten (e₄ = 659 Hz). Dabei sieht man deutlich, wie der Musiker ständig die Gestalt des Spektrums ändert, um wömglich jede Wiederholung desselben Klangbildes zu vermeiden. Solche Veränderungen bilden eben das Wesen der lebendigen und künstlerischen Musik.

2a



2b



A. Fragestellung

Seit Voxman's an der Universität Iowa 1936 vorgelegter Dissertation (Lit. 1) sind über die Klarinette viele spektrographische Abmessungen vorgenommen und interessante Ergebnisse veröffentlicht worden (Lit. 2, 3, 4). Die früher angewandte Methode der unmittelbaren Analyse bestand darin, daß man vermittels eines Frequenzanalysators einen gebührend lang ausgehaltenen musikalischen Ton untersuchte. Dabei wurde der jedem Spektrumsbestandteil anhaftende Energieprozentsatz abgemessen, wonach man das schematische Spektrum zeichnen konnte. Diese Art und Weise der Untersuchung hatte aber erhebliche Nachteile, dadurch nämlich, daß der spielende Musiker weite spektrale Veränderungen verursachte. Deshalb kam man auf den Gedanken, verschiedene künstliche Anblasevorrichtungen anzuwenden; dabei verfiel man auf andere Schwierigkeiten, da nun die Tonerzeugung nichts mehr mit den natürlichen Bedingungen zu tun hatte.

Das inzwischen entwickelte Tonbandgerät hat die ganze Angelegenheit um vieles erleichtert; damit genügt es nämlich, einen Ton etwa 2–3 Sekunden lang auszuhalten und eine Tonbandschleife herzustellen, die man danach beliebig untersuchen kann; der mit einem logarithmischen Pegelschreiber verbundene Schmalbandanalysator gestattet die denkbar leichteste Aufnahme des Spektrums in dB/Hz. Die somit erzielten Ergebnisse sind äußerst genau, und dennoch sind sie unterschiedlich je nach Instrument, je nach dem herangezogenen Musiker, je nach dem die Untersuchungen vornehmenden Forscher. Wir haben nämlich festgestellt, daß der ausführende Musiker ständig das Spektrum der normal gespielten Noten verändert, und dieses sein Verhalten wird durch die Wahrnehmungspsycho-physiologie völlig gerechtfertigt, da schon nach einigen Millisekunden ein gleichbleibender Ton öde, tot und ermüdend wirkt. Den üblichen Untersuchungsverfahren kann man also vorwerfen, daß sie unzureichend sind, und daß sie auf Laboratoriumsexperimenten fußen, die mit der Praxis der musikalischen Wirklichkeit nicht mehr viel gemein haben. Deshalb haben wir den Fragenkomplex wieder aufgeworfen und ihn vermittlels zweier neuer Untersuchungsverfahren anders angefaßt.

B. Verfahren und Ergebnisse

1. Sonagraphverfahren

Benutzt wurde von uns der Sonograph (Lit. 5), der in einer Zeitspanne von 2,4 Sek. den Frequenzverlauf als eine Funktion der Zeit darstellt: im Koordinatensystem steht die Zeit auf der Abszissenachse und die Frequenz (oder die Teiltöne) auf der Ordinatenachse. Die Aufnahmen ergeben, daß Klarinettenpektren sich ständig verändern. Betrachten wir (Abbild. 1) einen gehaltenen Klarinetten-ton: Grundton ist durch die unterste Linie 1, Teiltöne sind durch die darüber liegenden Parallelen dargestellt. Je stärker ein Teilton, desto dicker und schwärzer der Strich. Verfolgt man den einen oder den anderen Teilton, sieht man klar und deutlich, daß dessen Stärke

sich mit der Zeit verändert, und die Stärkegrade verlaufen gar nicht gleichmäßig von einem Teilton zum anderen. Z. B. schwillt der Grundton nach einer Sekunde gewaltig an, während Teilton 3 umgekehrt verläuft; Teilton 4 verstummt gänzlich nach ungefähr 1 Sekunde usw. Dazu läßt sich ein ständiges, unregelmäßiges Vibrato in der Tonhöhe vernehmen; am reichsten ist das Spektrum nach etwa 1½ Sekunden. Kurz und gut, man sieht klar und deutlich, wie sich das Spektrum unablässig verändert. Sämtliche im Laboratorium für Akustik der naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Paris vorgenommene Abmessungen zeigen, daß es mit allen Zungeninstrumenten, und ganz allgemein mit allen herkömmlichen Musikinstrumenten solche Bewandnis hat. Somit ist wohl erwiesen, daß die bis heute üblichen Verfahren, sowie die übliche Art der Darstellung der Schallspektren unzulänglich sind. Um den zu erwartenden Kritiken zu entgehen (so etwa die Ungenauigkeit des Sonographen und der im Laboratorium vorgenommenen Abmessungen) haben wir ein anderes Verfahren entwickelt und dazu eine im Handel erhältliche Schallplatte verwendet.

2. Verfahren mit dem Schmalbandanalysator

Besagte Schallplatte war: "Quatuor pour la fin du temps" (Quartett für das Ende der Zeit) von Messiaen (Erato LDE 3256 A); im 3. Satz (l'Abime aux Oiseaux) kommen insbesondere gewisse Klarinetten-töne zu Gehör, wo das Instrument mehr als 30 Sekunden lang einen selben Ton solo spielt.

Selbstverständlich kommt der dazu verurteilte Musiker, dem es obliegt, diese gehaltenen Noten musikalisch einigermaßen interessant zu gestalten, nicht umhin, gewisse dynamische spektrale Veränderungen vorzunehmen: die hier wiedergegebenen Beispiele sind in dieser Hinsicht ganz besonders charakteristisch.

Es wurde folgendermaßen verfahren: Vom Schallplattenapparat wurde der Ton unmittelbar in den Schmalbandanalysator geleitet (Bandbreite 2% der angegebenen Frequenz), der zuvor auf den Grundton eingestellt worden war. Ausgang des Gerätes ist mit einem üblichen logarithmischen Pegelschreiber verbunden. Die daraus gewonnene Abbildung gibt den dynamischen Verlauf des Grundtones (Verlauf der Stärkegrade in dB). Danach wiederholt man das Verfahren, indem man das Gerät auf den 2., 3. . . . usw. Teilton einstellt.

Hier nun zur Veranschaulichung 2 Beispiele:

Abbildung 2a: Untersucht wurde die Note $e^4 = 659$ Hz, die während etwa 30 Sekunden crescendo gespielt wird. Von oben bis unten gesehen, zeigt die Abbildung den dynamischen Verlauf der 10 ersten Teiltöne; Zeitablauf in Abszisse (senkrechte Linie alle 5 Sekunden) und Pegel in dB. (jede Zwischenlinie = 10 dB). Danach läßt sich leicht das Spektrum in jedem beliebigen Augenblick (so etwa nach 20 Sekunden) herauslesen: man braucht nur eine senkrechte Linie von oben bis unten zu ziehen und den Pegel in dB

eines jeden Teiltones aufzuzeichnen. So hat etwa in jener 20 Sekunde der Grundton 85 dB., 2. Teilton 68 dB., 3. Teilton 60 dB., usw. Sofort sieht man, daß die Hüllkurve des Spektrum in ständigem Wechsel begriffen ist, und man stellt fest, daß ein Teilton von einer Sekunde zur anderen um mehr als 25 dB. schwanken kann.

Abbild. 2b. Im selben Satz, etwas weiter, findet sich wieder dieselbe Note, von ungefähr gleicher Zeitdauer. Auch diese Note haben wir nach gleichem Verfahren untersucht; dabei bleiben die Ergebnisse der vorhergehenden Untersuchung voll gültig. Vergleicht man indessen Abbild. 2a und 2b, so sieht man, daß der dynamische Verlauf der Teiltöne ein anderes Aussehen vorweist; anders gesagt: der Musiker „spielt“ mit dem Spektrum und vermeidet die Wiederholung des gleichen Klanges.

Abbild. 3: Hier handelt es sich um die Note $d^2 = 146$ Hz (= die tiefste Note des Instrumentes), die in ebendemselben Satz 14 Sekunden lang gehalten wird. Auch da beobachtet man dieselben dynamischen Schwankungen, abgesehen indessen von den 3 ersten Teiltönen, die in ihrer Stärke verhältnismäßig konstant bleiben.

In Anbetracht jener Ergebnisse kann man sich die Frage stellen, woher eigentlich diese Schwankungen herühren, die der Musiker, allerdings in genau abgesteckten Grenzen, hervorrufen kann. Im Laboratorium für Akustik angestellte Forschungsarbeiten haben erwiesen, daß dazu 2 Hauptursachen in Betracht zu ziehen sind:

1. Die Mundhöhle (Lit. 6), deren Eigenfrequenz (Formantenbereich der Mundhöhle) sich ungefähr von 500 bis 2000 Hz erstreckt. Kennt man also den Grundton, so ist es ein Leichtes, die Teiltöne zu bestimmen, auf die der Musiker einzuwirken vermag. Bei einem Grundton von 659 Hz z. B. kann die Mundhöhle auf die Teiltöne 1, 2 und 3 (resp. 659, 1318 und 1976 Hz) einwirken. Bei einem Grundton von 146 Hz kann der Musiker die Teiltöne 4 bis 13 beeinflussen. Somit versteht man auch, warum in Abbild. 3 die 3 ersten Teiltöne sehr stabil bleiben.

2. Das Zungenblatt. Der Grundton der Eigenfrequenz der Klarinettenzungen ist unter den üblichen Gebrauchsbedingungen bei mehr oder minder starken Zungenblättern ausgemessen worden; im großen und ganzen schwankt er zwischen 2000 und 3500 Hz, was also den Formantenbereich des Zungenblattes ausmacht. Der Musiker kann leicht auf diese Frequenz einwirken, indem er Druckpunkt und Druckstärke mit seiner Unterlippe ändert. So wie vorher, ist es auch hier ein Leichtes, bei bekanntem Grundton die beeinflussungsfähigen Teiltöne des Zungenblattes auszurechnen. Somit versteht man auch, warum sich das Spektrum von den unteren bis zu den oberen Lagen verändert (es erklärt sich der Klangunterschied zwischen Trompeten- und Schalmeregister). Nebenbei gesagt, somit sieht man auch, warum die elementaren Grundlehren, wonach die geraden Teiltöne eigentlich fehlen sollten, unzulänglich und abänderungsbedürftig sind.

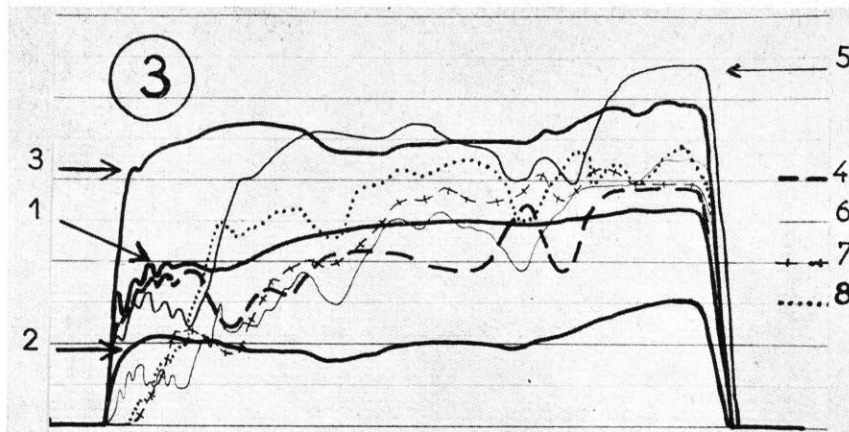


Fig. 3

Evolution dynamique des 8 premiers harmoniques de la note ré 2 — 146,8 Hz:

Les trois premiers harmoniques sont presque invariables parce que leur fréquence est située en dehors de la zone sensible de la cavité buccale (500 à 2000 Hz) et de celle de l'anche (entre 2000 à 3500 Hz). Une note musicale est un phénomène complexe évolutif. (ligne de base 50 dB; un interligne = 10 dB. Exemple: l'Harmonique 2 commence à 60 dB).

Dynamischer Verlauf der 8 ersten Teiltöne der Note d² = 146,8 Hz. Die 3 ersten Teiltöne sind beinahe stabil, weil ihre Frequenz sich außerhalb des Wirkungsbereiches sowohl der Mundhöhle (500 — 2000 Hz), als auch des Zungenblattes (2000 — 3500 Hz) befindet. Ein musikalischer Klang besteht an und für sich aus vielen ineinander verstrickten und dazu sich ständig verändernden Gegebenheiten.

C. Schlußfolgerungen

Wir haben gezeigt, daß die üblichen Darstellungen des Spektrums im Falle der Zungeninstrumente (Klarinette, Saxophon usw.) ungeeignet und nicht hinreichend getreu sind. Die einzig charakteristische Darstellung wäre jene, die das Streuungsfeld des Klanges jeder einzelnen Note gäbe: es müssen die Grenzen bestimmt werden, innerhalb deren der Musiker den Pegel eines jeden Teiltones kann schwanken lassen.

Des weiteren wäre zu berücksichtigen, daß die von den herkömmlichen Musikinstrumenten ausgestrahlten Klänge von ganz außerordentlich mannigfaltiger Zusammensetzung sind, wobei die

Schwankungen eben durch Einwirkung des Musikers auf das tonerzeugende Element herrühren. Und eben aus jenen Schwankungen besteht ganz eigentlich die lebende Musik. Bis auf weiteres bleibt das Sonographverfahren noch das ergiebigste, weil dieses Verfahren eben jene Schwankungen fotografiert und bildhaft wahrnehmen läßt. Vor allem handelt es sich in der Untersuchung des musikalischen Phänomens darum, den eigentlichen Vorgang zu bestimmen unter Einbeziehung der angrenzenden Freiheitsfelder: eine allzu peinliche Genauigkeit auf diesem Gebiet ist und bleibt vorläufig nur eine Vorspiegelung falscher Tatsachen.

Literatur

1. Voxman (H) The tone quality of the clarinet. Diss. University of Iowa Library (1936)
2. Seashore (C) Psychology of Music. Mc Graw Hill, New York (1938)
3. Saunders (F. A.) Analyses of the tone of a few wind instruments. JASA vol. 18 N° 2 (1946), S. 395—401.
4. Meyer (J) Die Klangspektren von Klarinetten. DAS MUSIKINSTRUMENT, 1964, Heft 2, Seite 133—138. Frankfurt a. M.
5. Leipp (E) De l'acoustique des instruments à cordes. Annales Telec. Tome 17, No. 5—6 (1962), Seite 99—105.
6. Leipp (E) La cavité buccale, paramètre sensible des spectres rayonnés par les instruments à vent. Comptes-rendus ICA, Seite 51. (1962) Kopenhagen.