

HERTZ & COPEAUX

Des Actes
Colloque

"RECHERCHE
SCIENTIFIQUE & FACTURE
D'INSTRUMENTS DE MUSIQUE"

Daniel Bariaux
Bernard Baschet
Charles Besnainou
Bernard Blanc
Pierre Bordonné
Xavier Boutillon
Josiane Bran-Ricci
Michèle Castellengo
René Causse
Antoine Chaigne
Daniel Cholley
Christian Cuesta
Dominique Douau
Joël Garnier
Rémi Gug
Jean-Marie Heinrich
Jean Kergomard
Marie-José Laporte
Jacques Leguy
Joseph Marchi
Jürgen Meyer
Jean-Claude Porée
Jean-Christophe Radier
Michel Robin
Michel Simane
Benny Sluchin
Claude Valette
Klaus Wogram


CENAM

Paris
19-20 Avril 1985

Sommaire

PRÉSENTATION	5
Remerciements	7

Thème 1 Contrôle de la qualité des instruments

Michèle CASTELLENGO

Contrôle de la qualité du timbre et de la justesse des instruments de musique. Réalisation d'un système électromécanique de contrôle de la perce longitudinale des instruments à vent .. 10

René CAUSSÉ

Capteurs de vibration, capteurs et microphone de contact 16 |

Jean KERGOMARD et René CAUSSÉ

Réalisation d'un pont de mesure d'impédance d'entrée des instruments à vent 20 |

Jean-Christophe RADIER★

Mesure d'impédance mécanique au chevalet des instruments à cordes 23 |

Antoine CHAIGNE

Etude comparative de la fabrication et de la qualité sonore des cordes de guitare 24 |

Jacques LEGUY

Etude expérimentale de la dynamique vibratoire des anches battantes 27 |

Dominique DOUAU

Contrôle des paramètres mécaniques et acoustiques des bois de lutherie 33 |

Thème 2 Conception de modification d'instruments à l'aide des connaissances scientifiques

Jean KERGOMARD

Calcul des résonances des instruments à vent, application à la conception de modifications .. 40

René CAUSSÉ et Benny SLUCHIN

Etude et conception des sourdines des cuivres 43 |

Charles BESNAINOU

Un nouveau type de cordes :
la corde spiralée 46 |

Michel SIMANE

Possibilités de modifications des instruments à cordes traditionnels par l'emploi de matériaux nouveaux pour la fabrication des cordes 49

Jean-Marie HEINRICH

Conception et réalisation d'une machine à gouger et gratter les anches à profil variable . 51

Claude VALETTE et Christian CUESTA

Tentative de caractérisation de différentes cordes pincées, application à l'étude de plusieurs cordes de clavecin 53 |

Xavier BOUTILLON

Comportement mécanique du marteau du piano, conséquence sur le timbre 56 |

Soirée de présentation d'instruments	60
- Nouveaux types de contrebasse et violoncelle (Société SIAM)	
- Flûte traversière octobasse (Jacques LEFEVRE)	
- Sonorisation électroacoustique d'une guitare classique (M. LEDUC)	
- Amplification d'une guitare baroque (Piere URBAN)	
- Clavecin évolutif	

Thème 3 Recherches industrielles et artisanales

Jean-Marie HEINRICH

Les facteurs d'instruments et la science du Moyen-Age au XVIII^e siècle 66

Jean KERGOMARD

Les grands innovateurs de la facture d'instruments à vent du XIX^e siècle (Boehm, Sax, Mahillon) et la science 67

Daniel CHOLLEY

L'embouchure de la flûte traversière 70

Joseph MARCHI

Mesures de pression statique sur la clarinette 72

Bernard BLANC

Recherches sur les bois de cabrettes 74

Joël GARNIER

La harpe à mémoire 78

Bernard BASCHET

L'innovation et son assimilation 80

Rémy GUG

Traitement des bois d'après des documents allemands du XVIII^e siècle 82

Thème 4 Collaboration recherche-industrie

Charles BESNAINOU★

Réflexions sur les brevets et la facture instrumentale 76

J.C. PORÉE★

Présentation de l'ANVAR 87

Marie-Josée LAPORTE★

L'Institut des Matériaux Composites : Présentation d'un exemple d'application à la facture instrumentale 88

Josiane BRAN-RICCI

Rapports entre le Musée Instrumental et les organismes de recherche 89

Michel ROBIN

Projets pour un laboratoire d'étude et de conservation au Centre de l'Instrument de la Villette 91

Pierre BORDONNÉ et Jean KERGOMARD

Tour d'horizon de quelques centres techniques; questions pour un projet d'un centre technique des instruments de musique 93

Daniel BARIAUX

Réflexions sur la facture instrumentale et l'acoustique musicale 94

Jürgen MEYER et Klaus WOGAM★

Recherches sur la justesse des flûtes à bec (collaboration Physikalische technische Bundesanstalt de Braunschweig et fabricants allemands) 98

LISTE DES PARTICIPANTS 99

Contrôle de la qualité du timbre et de la justesse des instruments de musique

MICHÈLE CASTELLENGO

LABORATOIRE D'ACOUSTIQUE MUSICALE - UNIVERSITÉ PARIS VI

Introduction

Parmi les diverses qualités que doit remplir un bon instrument : facilité de jeu, rendement sonore, solidité, grande étendue, la justesse et la qualité du timbre sont celles qui posent le plus de problèmes au facteur.

Au cours de la fabrication les exigences ne sont pas les mêmes selon qu'il s'agit d'instruments à vent ou à cordes. Dans les instruments à cordes et à percussion, l'architecture, la forme de l'instrument, de même que les matériaux dont il est construit déterminent le timbre. La justesse est pratiquement entièrement dépendante du musicien. Dans les instruments à vent au contraire, la perce longitudinale et latérale conditionnent la justesse, mais déterminent aussi en grande partie le timbre. Le matériau ne joue qu'un rôle réduit, que nous avons beaucoup de mal à mettre en évidence expérimentalement.

Les éléments de la chaîne Musicien-Auditeur

Le schéma suivant (fig.1) montre les différents éléments qui composent la chaîne acoustique depuis l'instrumentiste jusqu'à l'auditeur. Le facteur qui fait un « bon » instrument tient implicitement compte de toutes ces données. La plupart des exposés présentés à ce colloque traitent d'études expérimentales physiques qui apportent des éléments nouveaux pour mieux comprendre le fonctionnement des instruments de musique. Les notions de justesse et de sonorité dont nous allons traiter maintenant font intervenir le jugement des auditeurs donc impliquent une prise en compte des données de la psycho-physiologie. Si les moyens d'analyse du son ont énormément progressé ces dernières années, nos connaissances de la perception auditive sont encore parcellaires et reposent principalement sur des expériences faites avec des sons simples fort différents de ceux que produisent les instruments de musique.

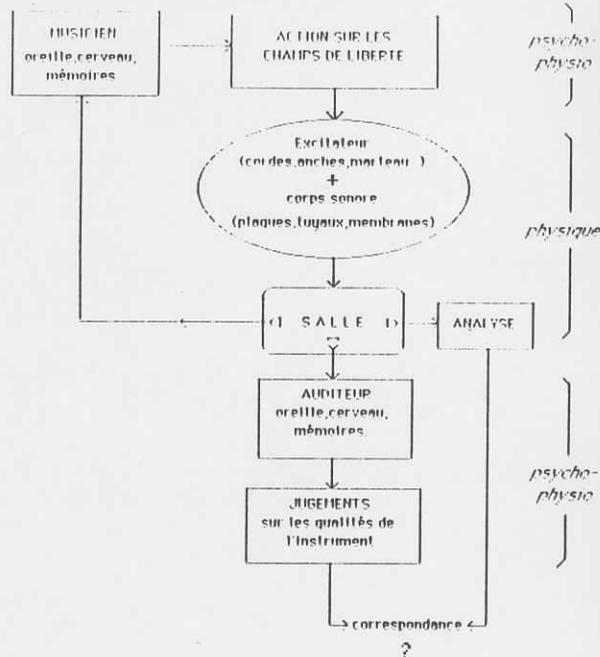


Fig.1 - La chaîne acoustique, de l'instrumentiste à l'auditeur.

C'est donc l'interprétation des mesures physiques en fonction de la perception qui reste la pierre d'achoppement des recherches en acoustique musicale.

La justesse des instruments à vent : généralités

Les problèmes de justesse concernent essentiellement les instruments à vent à trous latéraux. Parmi les musiciens, la justesse est appréciée « à l'oreille ». Cette façon de faire est sujette aux variations du moment et ne permet pas de progresser facilement : toutefois elle tient compte implicitement des particularités de notre audition et de plus, elle est juge en dernier ressort.

Pour mesurer la justesse il faut une référence à laquelle on va comparer les divers sons de l'instrument. La référence admise aujourd'hui

est celle des sons de la gamme du tempérament égal dont le diapason (la₃ en France, a₄ aux USA, a₁ en Allemagne) vaut en principe 440 Hz à 20°C. On trouve maintenant sur le marché toute une gamme d'accordeurs électroniques étalonnés selon cette référence. Leur usage est aisé et fort répandu pour l'accord des instruments à cordes à sons fixes. Mais la justesse d'un hautbois, d'une flûte, d'une clarinette ne peut se réduire à une fréquence. Le musicien varie la hauteur des sons pour les besoins du vibrato, pour souligner de façon expressive des changements d'intensité ou de timbre enfin pour jouer...juste. On sait en effet que la justesse mélodique n'obéit pas aux mêmes règles que la justesse harmonique. De nombreuses mesures faites en cours de jeu montrent qu'un bon musicien modifie la grandeur des intervalles selon l'attraction plus ou moins forte des divers degrés de la gamme et selon la pente ascendante ou descendante du phrasé mélodique (1 et 3). La justesse d'une note est donc plutôt une zone plus ou moins large, centrée sur la fréquence de référence. Le meilleur test pour les instruments à sons variables est donc le champ de liberté en fréquence (2).

Le champ de liberté en fréquence et son interprétation.

Ce test est simple à mettre en œuvre. Après avoir chauffé convenablement l'instrument le musicien doit émettre, pour chaque doigté, le «meilleur» son, puis chercher les bornes supérieures et inférieures de hauteur tout en restant

dans des limites acceptables de sonorité. La mesure à l'accordeur électronique permet d'établir un relevé significatif de la justesse de l'instrument. La fig. 2 donne un exemple de relevé pour une flûte à bec. Il peut exister, selon les musiciens, des différences dans l'appréciation des limites. On obtient alors des champs de liberté plus ou moins larges mais les accidents qui signalent les défauts sont aux mêmes endroits. On remarque généralement que le «meilleur» son est proche de la limite supérieure. Une autre méthode consiste à enregistrer des séquences musicales contenant toutes les notes de l'instrument et à établir le diagramme d'après les mesures faites sur l'enregistrement. Cette méthode, très réaliste a l'inconvénient d'être très longue avec l'accordeur. On peut espérer que le développement des moyens numériques permettra un calcul en temps réel de la fréquence et l'établissement automatique du champ de liberté.

L'interprétation demande quelques précautions. Si les notes de l'aigu sont hautes ce n'est pas forcément un défaut : à partir de 1500 Hz les intervalles doivent être agrandis pour paraître justes à l'oreille (4). Il peut arriver également qu'un son donne lieu à un accident de la courbe sans pour autant être perçu comme faux. En effet, la sensation de hauteur étant liée au timbre, si la sonorité particulière de cette note nous la fait percevoir basse le musicien aura tendance à la monter. Bref, la meilleure référence est encore la courbe d'un instrument réputé pour sa justesse.

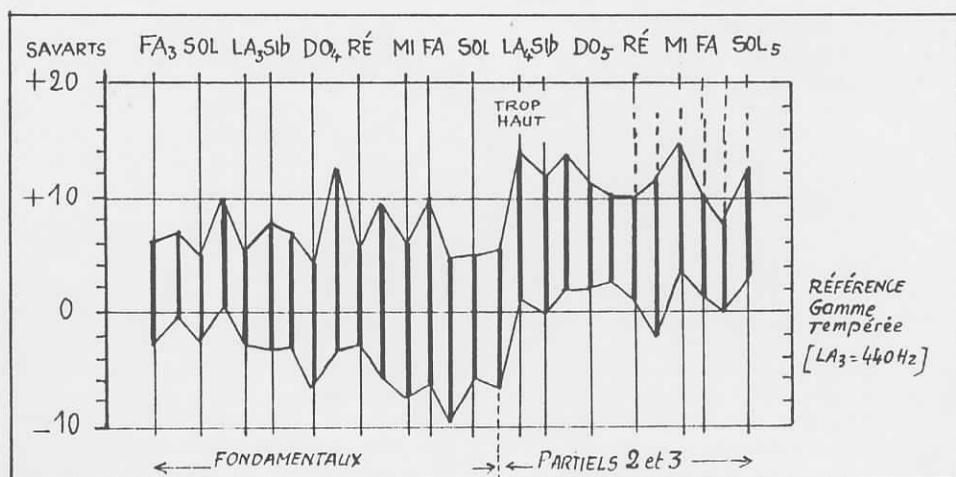


Fig.2 - Champ de liberté des fréquences d'une flûte à bec alto.

La mesure de la perce longitudinale du tuyau.

La perce longitudinale d'un tuyau conditionne en grande partie la justesse et la sonorité d'un instrument à vent. Afin de la contrôler rapidement et précisément nous avons réalisé au laboratoire, en collaboration avec Henri Gohin, un dispositif basé sur l'idée de Rod Cameron (fig.3). L'appareil comprend un capteur, un pont de mesure et un enregistreur graphique sur lequel s'inscrit la courbe. Celui-ci s'obtient directement et en une fois lors du passage de l'outil dans l'instrument. Lorsque la tige souple du capteur se déforme pour suivre le profil du tuyau la résistance de la jauge de contrainte collée à sa surface se modifie, ce qui entraîne

des variations du courant électrique dans le pont de Wheatstone.

Un palpeur peut fonctionner linéairement dans une gamme étendue de diamètres, par exemple de 8 à 20 mm, avec une bonne précision, de l'ordre du $1/100^{\text{e}}$ de mm. On peut descendre jusqu'à 4 mm de diamètre. En dessous la réalisation devient très délicate et la sensibilité diminue avec la réduction de la taille de la jauge. Il n'y a pas de limite pour les gros diamètres. La principale difficulté rencontrée dans la réalisation de cet instrument est celle du centrage de l'outil dans le tube. Le palpeur que nous utilisons demande beaucoup de doigté... donc un certain apprentissage. D'autres formes de palpeurs sont à l'étude.

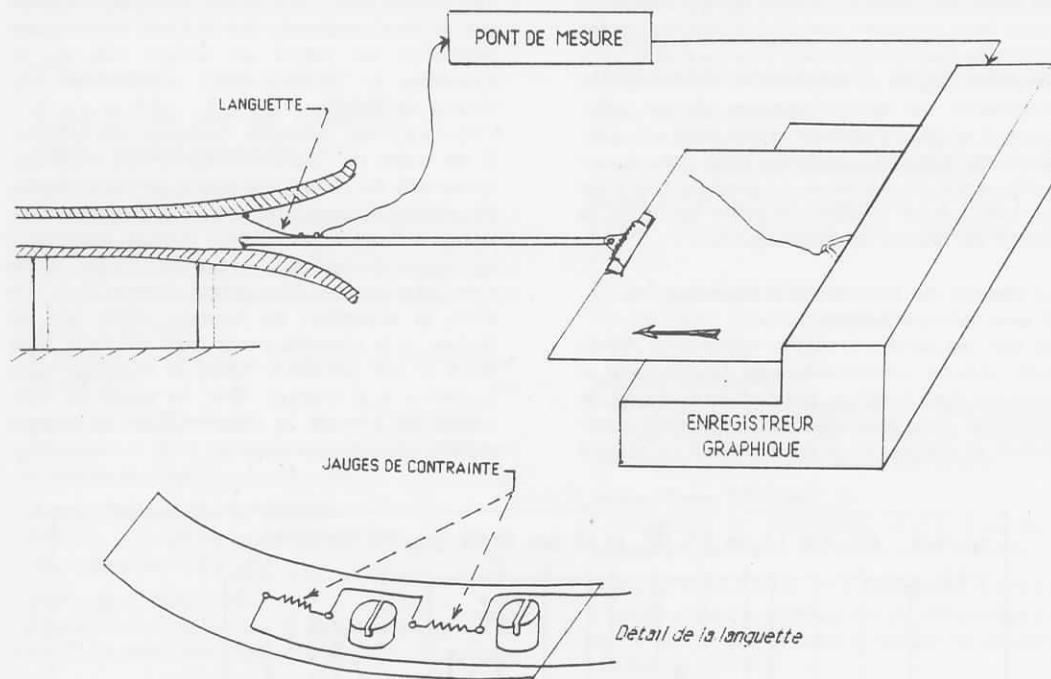


Fig3 - Schéma du dispositif de mesure de la perce longitudinale.

Timbre et sonorité.

Voilà bien la partie la plus difficile à apprécier dans un instrument de musique. Si la justesse est une grandeur mesurable, que l'on peut porter sur un axe, la sonorité, (la simplicité du mot est trompeuse) touche à plusieurs aspects du son de l'instrument. Un musicien parle de la rondeur du son, de l'homogénéité, de la netteté, de la souplesse... toutes qualités bien définies

pour lui mais que nous sommes bien loin de savoir analyser.

Reconnaître le timbre d'un instrument c'est identifier dans l'onde sonore les caractéristiques acoustiques liées au mode d'excitation et au corps sonore. Celles-ci commencent à être bien connues. Ainsi, le timbre de la flûte se distingue essentiellement de celui du hautbois par la forme et la durée du transitoire d'attaque ainsi

que par le contenu spectral. Pour d'autres instruments comme la guitare, le piano, c'est le transitoire d'excitation qui sera déterminant. Les traits caractéristiques du timbre résistent bien aux déformations dues à la transmission : filtrage, coloration de la salle ou des haut-parleurs. Aux diverses sortes d'instruments correspondent donc des classes acoustiques de timbre.

Juger de la sonorité d'un instrument c'est apprécier les fines variations sonores à l'intérieur d'une classe de timbre. En d'autres termes, la sonorité relève des mêmes paramètres acoustiques que le timbre mais porte sur leur appréciation qualitative. Celle-ci est extrêmement dépendante des conditions d'émission et de réception du son.

Sonorité et rayonnement.

Les instruments possèdent plusieurs points d'émission dont l'intensité, la directionnalité et le contenu spectral se modifient avec la tessiture (5). Ils produisent donc un champ acoustique hétérogène et la forme d'onde, responsable de la sonorité change avec le point d'écoute (fig.4). Il suffit de s'approcher d'un instrumentiste et d'écouter attentivement en se déplaçant autour de lui tout en changeant de hauteur pour remarquer combien la sonorité se modifie. A

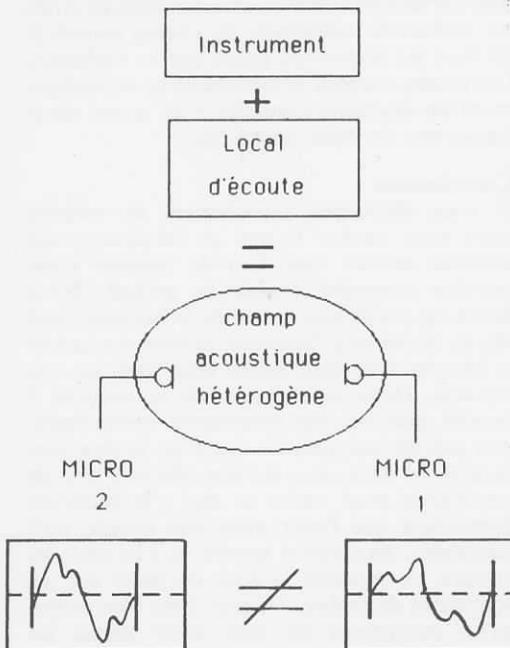


Fig.4 - Le champ acoustique émis par un instrument varie considérablement d'un point à l'autre du local d'écoute.

distance, les variations sont moins critiques mais l'influence des qualités acoustiques du local d'écoute devient grandissante. Lors du travail de recherche avec Bernard Blanc ce problème s'est révélé extrêmement critique. Le micro, placé à 1,50 m en face de l'instrumentiste donnait pour 2 positions différentes, éloignées l'une de l'autre de 10 cm, des spectres très différents (fig.5). Le plus remarquable est qu'un auditeur puisse se faire une idée globale, cohérente de la sonorité malgré la disparité des signaux.

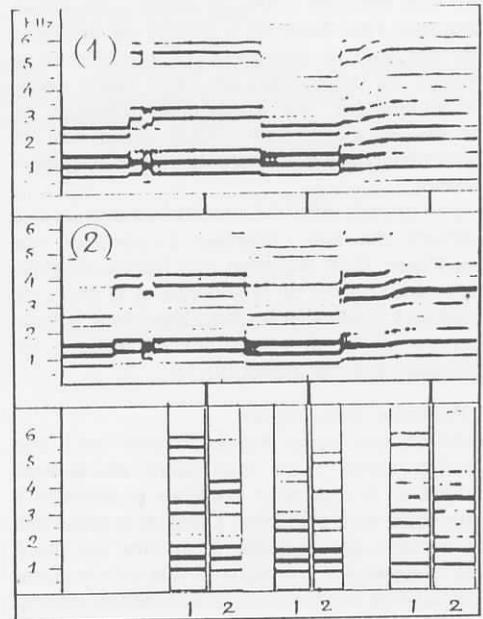


Fig.5 - Sonogrammes du son d'une cabrette enregistré en deux points proches (1 et 2), et spectres comparés pour 3 notes.

Méthodes d'étude de la sonorité.

Nous sommes encore loin de pouvoir proposer un protocole de contrôle de la sonorité. Voyons plutôt les méthodes d'étude que l'on peut utiliser.

a) Les tests d'écoute

Il s'agit de recueillir l'avis de divers auditeurs pour formuler un jugement un tant soit peu statistique. Le fabricant, l'essayeur et les divers amis qui participent aux premiers essais d'un instrument ne procèdent pas autrement. Ils forment certes un milieu restreint mais ont l'avantage de posséder une grande expérience

d'écoute et un vocabulaire commun aussi riche et complexe que celui des tastevins ! Si l'on veut faire appel à une plus grande audience, il faut enregistrer les instruments en prenant toutes les précautions nécessaires pour que les essais soient comparatifs : même musique, même lieu, même position par rapport aux micros, mêmes conditions d'écoute, etc. Mais d'autres difficultés surgissent : ordre des présentations, fatigue d'écoute, diversité des termes employés pour qualifier le son. Un point enfin reste incontournable : pour que tout soit comparable, le même musicien doit jouer plusieurs instruments or « tel instrument approprié au jeu d'un artiste sera peut-être mauvais entre les mains d'un autre » remarque Paul Kaul (6) à propos de certaines contradictions au classement d'un concours de sonorité de violoncelles en 1910. Nous avons fait récemment une expérience d'écoute de guitares au laboratoire : l'avis porté sur les instruments changeait selon la paire d'enceintes utilisées...

La plus grande difficulté consiste en dernier lieu à obtenir des avis utilisables du point de vue acoustique. Cela suppose une bonne connaissance des critères de la sonorité et le choix de séquences musicales les favorisant tour à tour. L'expérience de J. Meyer sur 15 guitares est intéressante à cet égard (7).

b) *Analyses acoustiques*

Après ce que nous avons dit plus haut, une question surgit : en quel point allons-nous enregistrer le son pour analyser la sonorité ? Deux voies sont possibles. Dans un premier cas, l'instrument, par exemple la guitare, est placé dans une pièce anéchoïque et mis en vibration, à chacune de ses fréquences de fonctionnement, par un excitateur fixé au chevalet. Le son recueilli par plusieurs microphones disposés sur une sphère entourant l'instrument donne finalement lieu à un son moyen qui est analysé. C'est une méthode sûre et reproductible. Son principal défaut est de ne pas prendre en compte le fonctionnement de l'instrument en régime transitoire.

Dans un deuxième cas, on enregistre, avec toutes les précautions décrites plus haut, diverses séquences musicales caractéristiques jouées par un musicien. Le point d'enregistrement choisi sera celui d'un auditeur privilégié placé face à l'instrumentiste (lequel doit évidemment rester parfaitement immobile). La méthode est plus satisfaisante musicalement : analyses acoustiques et tests auditifs peuvent porter sur les mêmes fragments et l'instrument fonctionne « normalement ». Cependant, comme il n'est pas possible d'attacher l'instrumentiste (!) on n'est

jamais tout à fait sûr de la parfaite reproductibilité de la prise de son, ni certain non plus de la neutralité du joueur par rapport aux instruments.

Les analyses proprement dites sont classiques : spectre moyenné dans des bandes d'octaves ou de 1/3 d'octaves, évolution temporelle du spectre (sonagraphe), analyse à l'ASD de la fréquence des bruits transitoires. La difficulté réside dans l'interprétation des résultats et nous ne sommes pas encore prêts actuellement à faire correspondre totalement les caractéristiques acoustiques aux critères auditifs. Ce domaine de recherche est en pleine évolution.

c) *Analyses des qualités intrinsèques de l'instrument responsable de la sonorité.*

Ce dernier point suppose que nous avons parfaitement compris le fonctionnement d'un instrument et que nous connaissons la contribution de chacune de ses parties dans la constitution de la sonorité.

Ce sont par exemple l'étude des résonances d'un instrument à vent par la méthode de l'impédance (cf. Kergomard) ou celle des caractéristiques mécaniques et acoustiques du bois pour les instruments à cordes (cf. Douau).

L'intérêt de ces approches est de permettre réellement des mesures afin de définir des moyens de contrôle sûrs et automatiques. Enfin on s'affranchit totalement du champ sonore et de tous les problèmes posés par sa captation. Les études menées actuellement en acoustique musicale devraient conduire à un grand développement de cette approche.

Conclusions

Si nous disposons actuellement de moyens aisés pour capter le son et l'analyser, nous sommes encore bien loin de pouvoir comprendre comment l'oreille le perçoit. Nous avons vu que, la perception de la hauteur étant liée au timbre et à l'intensité, la seule mesure de la fréquence ne peut suffire pour mesurer une justesse. Dans le domaine de la sonorité il semble que les instrumentistes recherchent, non pas les instruments ayant un timbre bien caractérisé mais ceux qui leur offrent le plus de possibilités pour varier le son ; le musicien demandera que l'instrument soit souple, qu'il « réponde », en d'autres termes qu'il lui offre les moyens de modeler le son, de jouer sur les contrastes de timbre. De plus il est bien connu qu'un instrument ne peut avoir toutes les qualités ni convenir à toutes les musiques.

Donc, plus que la recherche d'une justesse ou d'une sonorité idéale qui n'ont pas de réalité, le facteur doit être capable d'orienter la fabrica-

tion afin de cerner l'optimum du moment. Les moyens de contrôle dont nous disposons peuvent l'aider à faire des mesures comparatives soit pour estimer les changements (de

justesse et de sonorité) consécutifs à une modification de la fabrication, soit pour se rapprocher plus rapidement et plus sûrement d'un modèle jugé «bon» par tous. ●

Bibliographie

- (1) LEIPP E. CASTELLENGO M. - Du diapason et de sa relativité. La Revue Musicale, N°294. R. Masse Ed. Paris (1977).
- (2) LEIPP Emile - Les champs de liberté des instruments de musique. Bull. du GAM N°10 - Paris (1965).
- (3) CASTELLENGO M. et coll. - La flûte traversière à une clé. Bull. du GAM N°97 - Paris (1978).
- (4) CASTELLENGO M. - Un problème de perception de la hauteur dans l'aigu et le suraigu. In «Accordage et audition». Bull. du GAM N°76 - Paris (1974).

- (5) GARCIA A. - La directionnalité des instruments de musique. Bull. du GAM N°110 - Paris (1983).
- (6) KAUL Paul - Les grotesques de la lutherie. Imprimerie du commerce ; Nantes (1922).
- (7) MEYER J. - Quality aspects of the guitar tone. In «Function, Construction and Quality of the Guitar». Royal Swedish Academy of Music N°38. Stockholm (1983).

Nota : On peut se procurer les bulletins du GAM au laboratoire d'Acoustique, Tour 66, 4 place Jussieu, Paris 5^e.