

E. LEIPP

n° 93



GUITARE

et

RECHERCHE

ACOUSTIQUE

Oct. 1977

GAM

BULLETIN du GROUPE d'ACOUSTIQUE MUSICALE
Université de PARIS VI Tour 66 4 Pl. Jussieu PARIS 5°

93° REUNION DU G.A.M.

Thème : GUITARE et RECHERCHE ACOUSTIQUE

Exposé : de M. LEIPP

M. le Professeur L. GAUTHIER n'a pu être des nôtres pour raison de santé
M. le Professeur R. SIESTRUNCK, président, avait des obligations professionnelles.

Etaient présents :

M. J.J. BERNARD, Directeur de l'U.E.R. de MECANIQUE - Université de Paris VI.
M. LEIPP, Secrétaire général
Melle CASTELLENGO, Secrétaire

Puis, par ordre d'arrivée

M. KERGOMARD (CNRS); M. FREDI REYNA, Guitariste (guitare à 4 cordes); M. GENET-VARCIN (Codonologue); Mme GENET VARCIN; M. BEDIKIAN (luthier); M. JEANDROZ (Etudiant Son INSAS Bruxelles); M. MEYER (luthier); M. FARELLE (Etudiant musicologie); M. DANIEL (Prof. de musique); M. GEOFFRAY (Elève ingénieur ENSET); M. J. VANSTRAELEN (journaliste); M. LEOTHAUD (assistant Sorbonne); M. ENDERS (étudiant); M. MISEREY (Physicien); M. ASTA (Ingénieur, Rome); M. COUSSEMENT (Etudiant); M. FRIEDERICH (guitarier d'art); M. ASSAN (Etudiant); M. RENGNER (Etudiant); M. DUPREY (architecte); M. CORDEAU (Professeur); M. BALDINO (Professeur); Mme CHARNASSE (CNRS); M. HARDOUIN (organologue); M. LAVIALLE (Professeur); M. ALFANDARI (Professeur); M. SIMANE (cordes SAVAREZ : Babolat Maillot Witt); M. CRIQUI (élève ingénieur); M. BRIERRE (lycéen); M. HIBERT (Etudiant); Mme BOREL-MAISONNY (orthophoniste); M. DESPORTES; Melle SIBOURD (Etudiante); M. DUBEAU (Etudiant); M. TRAN VAN KHE (Directeur de recherches CNRS); M. ZAPATA (musicien); Melle VALIBOUSE (Etudiante Conservatoire National de Musique); M. RIBOUILLARD (luthier); M. LEGROS (Ingénieur); M. DELUNE Administrateur Civil, Ministère de l'Industrie et de la Recherche; M. LEBOEUF (Prof. Honoraire et Mme LEBOEUF; Mme RAIZELSON; Dr POUBLAN (Médecin biologiste); M. MAS (artiste peintre); M. MORCKERKEN (Etudiant); Mme METAYER (Enseignante); M. LESUEUR (luthier); Melle LEROY (EPHE); M. CEZEN (preneur de son); M. JOUHANEAU (Collège de France); Mme BRAN RICCI (Conservateur du Musée Instrumental du Conservatoire); M. CHACEREL (luthier); M. PERRIN (luthier); M. JOYEUX (facteur d'instruments). M. BESNAINOU (électronicien, luthiste, luthier); M. Bernard MAILLOT (Directeur de la fabrique de cordes harmoniques BABOLAT MAILLOT WITT, Lyon); Mme BOURGOIN-MILLER (orthophoniste); M. CHARNOZ (MMA); Dr KADRI (médecin).

Etaient excusés : M. Charles MAILLOT (Lyon-Nice); M. BATAISSIER (SIERE); M. GUEUENS (Bruxelles); M. VIDAL (pris par le concours international de guitare).

PERIODIQUE : 6 numéros annuels

Directeur de la publication : M. le Professeur R. SIESTRUNCK
N° d'inscription à la Commission Paritaire : N° 819 ADEP

Diffusion du bulletin du G.A.M. : S'adresser à
LE DROIT CHEMIN DE MUSIQUE
5, Rue Fondary
75015 - PARIS - Tél : 575-12-14

GUITARE ET RECHERCHE ACOUSTIQUE

I. INTRODUCTION

Lors de notre dernière réunion, en juin dernier, M. FRIEDERICH nous avait proposé le résultat de ses investigations historiques et de ses recherches expérimentales personnelles en facture instrumentale. Il nous a dévoilé un certain nombre de ses " secrets ", entre autres ses méthodes pour tester la qualité des bois utilisés, sa façon de relever la fréquence propre des diverses parties de la guitare (en les faisant " sonner " avec une tige de verre excitée par frottement longitudinal etc...). Il nous a fait écouter le résultat sonore de quelques-uns de ses essais en facture instrumentale et nous a fait toucher du doigt ce qui se passait auditivement lorsqu'on diminuait les épaisseurs du fond, lorsqu'on bouchait la rose, qu'on ouvrait une rose dans le fond, qu'on diminuait les éclisses de moitié etc.. Ce genre d'expériences est à mon sens du plus haut intérêt, et il faut souligner le fait que FRIEDERICH est un cas rarissime de luthier faisant de la lutherie expérimentale : une activité qui est très " rongeuse " de temps et qui ne rapporte rien dans l'immédiat ! Mais il n'est pas douteux que seules des expérimentations de ce genre peuvent faire progresser la lutherie et amener petit à petit un luthier à maîtriser son art, à faire bien, à faire mieux, à faire autre chose que ce qui se fait actuellement. Mais voilà ; le bénéfice d'une recherche expérimentale empirique n'apparaît qu'à longue ou très longue échéance, et entre temps il faut vivre... On ne peut donc qu'admirer FRIEDERICH d'avoir " perdu ", depuis le début de sa carrière autant de temps à chercher des données utilisables pour la pratique de son art. En fait, la lutherie d'art recouvre des problèmes technologiques et perceptifs d'une difficulté inouïe : j'ai quelques bonnes raisons pour l'affirmer ! Il faut maîtriser d'abord les matériaux et la technique de facture pour réaliser " l'ébénisterie " d'un instrument complet. Mais un instrument est fait pour être joué et écouté ! Et là s'introduisent des paramètres anatomo-physio-psychologiques qui sont d'autant plus difficiles à saisir et à traiter que les spécialistes de l'audition ne nous apportent que des données extrêmement lacunaires, et que les paramètres perceptifs varient à l'infini d'un individu, d'un guitariste et d'un auditeur de guitare, à l'autre. Certains de ces éléments humains peuvent être appréhendés et contrôlés empiriquement si le chercheur a une longue patience et des facultés de raisonnement et d'observation sortant de l'ordinaire. Car la lutherie est un " art ", et ce mot implique une combinaison de variables d'une complexité hors mesure avec ce que s'imaginent les naïfs de la lutherie. Ces naïfs sont légion en ce moment : la mode est apparue, avec les " Kits ", de s'improviser luthier, fabricant de flûtes, facteur de clavecins... sans avoir appris le métier et même sans avoir appris à jouer correctement l'instrument qu'on veut fabriquer. En général, la réalité s'impose vite, dès qu'on prend l'outil en main, et qu'on soumet l'instrument au " juge de dernière instance " : l'oreille de l'utilisateur ou de l'auditeur. Un métier d'art ne s'apprend pas en un ou trois ans!... Et quelles que soient la patience, l'habileté et l'imagination du luthier, il est des phénomènes et des points difficiles à saisir, même avec les moyens " sophistiqués " que nous propose l'acoustique. La raison de ce fait vient en particulier de ce que notre oreille (l'outil de recherche du luthier) est incapable de faire l'analyse d'un son, d'en mesurer les dimensions physiques etc... La véritable difficulté réside dans l'interprétation des mesures et diagrammes physiques. Je parle de cela en connaissance de cause ! J'ai eu la chance, grâce à A. MOLES, de faire partie de la première génération des chercheurs qui ont tenté de mettre au point des méthodes pour définir la qualité sonore d'un instrument de musique afin de promouvoir une lutherie rationnelle. Je m'occupais de violons, un problème que je connaissais bien. Mais dès 1950 un fabricant de cordes harmoniques, M. Charles MAILLOT de Lyon (cordes Ysaye Savarez etc...) me signala qu'un instrument à peu près complètement oublié à l'époque, la guitare, " montait en flèche ", M. MAILLOT me fournit alors les moyens d'amorcer une recherche sur la guitare, et d'abord sur son " moteur acoustique " : les cordes. Une étude s'avérait nécessaire, car un matériau nouveau, le " nylon ", venait d'apparaître. J'ai donc amorcé une étude sur les cordes de guitare, en collaboration avec des guitaristes, LAGOYA entre autres, dont les avis d'utilisateurs étaient indispensables si l'on se proposait de raccorder de façon réaliste les paramètres physiques des cordes avec le résultat auditif. Le premier problème consistait à mettre en évidence ces paramètres. Les recherches ont duré près de 20 ans...

et elles ne sont pas encore terminées. Mais il existe désormais des moyens : je viens de visiter le petit laboratoire de recherche installé dans la fabrique de cordes harmoniques où se font les cordes de guitare les plus appréciées (cordes Savarez), et qui comporte un sonographe, entre autres... L'expérience a montré ici que la " recherche scientifique peut apporter quelque chose en fabrication de cordes. Elle pourrait en faire autant en lutherie, mais il faudrait que les luthiers en soient convaincus, et je l'ai dit : le cas de FRIEDERICH est rarissime!

Revenons à nos... guitares. La science acoustique peut-elle vraiment apporter quelque chose à la guitare ? C'est ce que je vais tenter de préciser ici, à la lumière de mes recherches personnelles, dont beaucoup furent d'ailleurs faites avec la collaboration de Friederich dès le départ ! Et pour commencer essayons de poser le problème,

II. POSITION DU PROBLEME

A la suite de quelques discussions soulevées par les documents iconographiques que FRIEDERICH nous a présentés lors de la dernière réunion, il est apparu clairement, une fois de plus, qu'il faut absolument définir avec précision ce dont on parle. Ne pas le faire, c'est aller audevant de disputes stériles qui relèvent uniquement de la terminologie employée, et non des faits en cause.

Il serait intéressant de connaître la date d'apparition du mot " guitare "... Mais je sais à quel point ces recherches sont décevantes, pour avoir fait des efforts dans ce sens à propos du mot " violon ". L'apparition du nom d'un instrument n'est pas nécessairement liée à l'apparition de l'instrument que nous désignons sous ce vocable de nos jours. On pourrait citer d'innombrables exemples... et les musicologues, ignorant souvent tout de la lutherie, n'ont pas toujours simplifié les choses. Qu'est-ce donc qu'un " luth ", qu'une " guiterne "... par exemple ? Ces mots recouvrent tout ce qu'on veut, selon les spécialistes qui en parlent. Qu'est-ce donc qu'une " Geige " en allemand ? visible-ment ce mot recouvre toute une série d'instruments à cordes dont la caisse, le nombre et l'accord des cordes etc..., sont absolument quelconques, mais dont la seule particularité est d'être excités par un archet à mèche! Bref, il est bien inutile de disputer sur un texte comportant le mot " violon " ou "guitare" si on n'a pas défini avec précision ce qui est en cause. Je précise donc ce dont je vais parler ici est exclusivement la guitare classique actuelle, instrument à cordes pincées par les doigts, dont le manche possède des frettes (barrettes) disposées pour notre musique occidentale. Cette "guitare classique est formée d'une caisse de 49 cm de long environ, comportant une table et un fond quasi-plans et des éclisses de 10 cm de haut à peu près. Les cordes ont une longueur vibrante de 65 cm. Elles sont fixées à un chevalet collé sur la table. Bref, c'est la guitare classique, telle que la fabriquent actuellement de nombreux artisans et industriels européens, japonais, allemands, français etc... L'instrument possède 6 cordes, accordées par quarts et tierce aux notes suivantes : mi_3 (330 Hz) ; si_2 (247 Hz) ; sol_2 (196 Hz) ; $ré_2$ (147 Hz) ; la_1 (110 Hz) ; mi_1 (82 Hz) ; (fréquences approximatives). J'insiste sur le fait qu'une guitare apparemment de même type peut devenir un instrument fonctionnellement et acoustiquement tout à fait différent pour peu que l'on modifie un détail infime en apparence. Ainsi, il suffit par exemple de fixer les cordes au bord de la table plutôt que sur un chevalet collé, (guitare de jazz), et de les faire passer sur un chevalet mobile, pour modifier tout le système acoustique. Ce simple " détail " modifie ^{voûte} complètement les phénomènes vibratoires rayonnés, la " sonorité " !

Voici donc précisé ce que j'appelle " GUITARE " ici. Mais il est bien évident qu'on peut appeler " guitare " tout instrument comportant une caisse quelconque, même à table de peau, un nombre de cordes quelconques, accordées de toutes les façons imaginables,

et pincées au doigt ou avec plectre etc.. Et il est évident que le musicologue peut dès lors appeler "guitare" de nombreux instruments dont l'iconographie nous montre les images. De ce point de vue, il est d'ailleurs nécessaire de faire quelques restrictions, et d'inciter à la prudence.

En effet, lorsqu'on trouve des dessins, des peintures ou des sculptures du passé représentant un instrument de musique, il faut savoir d'abord dans quelle mesure l'artiste connaissait l'instrument et savait éventuellement en jouer. Il faut aussi tenir compte de son degré d'habileté pour représenter une forme souvent difficile à reproduire. D'une façon très générale, l'artiste, le graveur, le peintre, le sculpteur surtout, simplifie, schématise, supprime des détails, dont l'importance acoustique peut être considérable; il oublie des organes essentiels, en rajoute d'autres etc... Mais tout cela n'est pas notre affaire ici : cela montre simplement la nécessité qu'il y avait de bien préciser ce qui est en cause ici, à savoir une "machine à faire des sons" bien définie dans tous ses détails, et dont il n'est pas inutile de rappeler sommairement les principes de fonctionnement avant de parler de quelques recherches personnelles que j'ai faites.

III. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DE LA GUITARE CLASSIQUE

Comme tout autre instrument de musique à cordes, la guitare est une "machine" à faire des sons soulevant des problèmes de statique, de dynamique vibratoire et d'acoustique "auditive". Dans ce genre d'instruments on trouve nécessairement deux parties distinctes :

- le système excitateur (le "moteur"), représenté par les cordes, à qui on communique une quantité d'énergie potentielle donnée, en l'écartant de sa position d'équilibre.
- un système "résonant", une "caisse", qui transforme et rayonne dans l'air l'énergie communiquée par les cordes.

Le couplage "moteur" - résonateur pose des problèmes épineux. C'est de ce couplage que dépendent largement les qualités sonores de l'instrument. L'extrême complication du problème fait que la seule méthode d'approche pour étudier l'acoustique d'un tel instrument reste la méthode des variations concomitantes. On sait de quoi il s'agit. On modifie une partie ou un paramètre matériel de l'instrument, et on étudie le résultat sur la sonorité globale. Pour cela, il faut évidemment des moyens d'investigation acoustiques appropriés.

Les moyens dont je disposais à l'origine, malgré leur inadéquation fondamentale, m'ont tout de même permis de comprendre les mécanismes de fonctionnement d'une guitare. Ces moyens étaient simples, et je pense intéressant de les rappeler.

Il s'agissait d'abord d'un microscope. L'expérience a montré qu'on peut faire d'intéressantes observations directes sur les phénomènes vibratoires en direct, sans toucher à l'instrument en quoi que ce soit. Ce dernier point est important! Si, pour étudier les vibrations d'un point d'une guitare, on y fixe par exemple un capteur de vibrations, possédant une masse notable, on modifie du tout au tout, parfois, le fonctionnement du système qu'on se propose d'étudier. L'observation directe, optique, est donc intéressante. Prenons le cas d'une corde filée, pincée normalement. On ménage sur la corde un point brillant (petit coup d'épingle sur une spire du métal de filage). En utilisant une source lumineuse plus ou moins ponctuelle, on voit ce point lumineux décrire des "images" géométriques fermées, de forme compliquée, évolutive, variant avec les caractéristiques de la corde (fausseté par exemple etc...). Si on dispose d'un stroboscope envoyant à

intervalles réglable des éclairs lumineux, on peut " ralentir " le mouvement pour mieux l'observer - ce qui est possible s'il est quasi périodique... Pour observer les vibrations longitudinales ou torsionnelles d'une corde, on peut coller en un point donné de la corde une " aiguille " de papier (pratiquement sans masse) et faire des remarques tout à fait intéressantes. Ces méthodes étaient en fait les seules que pouvaient utiliser les acousticiens des temps passés. Mais l'électro-acoustique nous a graduellement fourni d'autres moyens plus efficaces. Dès le début de mes recherches, M. Charles MAILLOT avait mis à disposition un oscillographe, un générateur de basse fréquence, un filtre, un magnétophone, un diapason entretenu électriquement etc... Ceci permettait dès lors de faire des observations plus précises sur écran oscillographique, des mesures, des diagrammes. Pour l'étude des cordes, ces appareils furent précieux. Pour observer les phénomènes vibratoires des tables d'instruments, il fallait autre chose! Avec A. MOLES nous avons fabriqué un petit capteur de vibrations, simple mais efficace. Il s'agissait d'un aimant permanent de haute qualité (ticonal) portant un enroulement de fil électrique fin, branché sur l'oscillographe; une pastille en fer très légère était collée sur un point de l'instrument à étudier (chevalet, sillet du manche, point de la table etc...) On pouvait étudier aisément, sur l'écran, le mouvement du point considéré! Petit à petit, les observations cumulées ont apporté les éléments d'une " doctrine " sur le fonctionnement de la guitare : moteur et résonateur, doctrine dont je résume ici les points essentiels :

1°) LES CORDES; LE MOTEUR. Une corde, pincée par déplacement latéral, s'écarte de sa position d'équilibre; lorsqu'on la relâche, elle est nécessairement le siège de quatre modes vibratoires :

- Vibration transversale : Selon les théories élémentaires elle décrit un fuseau vibrant dans un plan. Dans la réalité, une corde pincée décrit un " volume " fusiforme. Le " fuseau ", du fait de la fausseté plus ou moins grande de corde (il n'existe pas de cordes parfaites...) change continuellement de forme dans le temps. On vérifie ainsi que les choses sont beaucoup plus compliquées que ne le suggèrent les manuels de physique élémentaire. On peut cependant retenir en première approximation, la formule qui définit la fréquence des vibrations transversales en fonction des principales variables physiques en présence :

$$N_t = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}}$$

où N_t est la fréquence transversale, L la longueur, T la tension et m la masse linéique ("poids" de l'unité de longueur choisie). On sait ainsi sur quels paramètres physiques on peut jouer pour modifier la fréquence de la corde qui détermine la hauteur de la note qu'elle donne.

- la vibration longitudinale : Lorsqu'on déplace latéralement un point d'une corde, deux choses peuvent se passer :

ou bien la corde est en matériau extensible, et alors elle s'allonge et se raccourcit périodiquement lorsque la corde abandonnée à elle-même se met à vibrer. Cet allongement périodique excite alors la vibration longitudinale de la corde (qu'on peut mettre en évidence simplement en la frottant en biais avec un archet). La fréquence de cette vibration longitudinale est généralement beaucoup plus aiguë que celle de la vibration transversale (plusieurs octaves). Cette fréquence est indépendante de la tension de la corde (du moins en théorie... et pour les matériaux non extensibles), mais elle est fonction inverse de la longueur, et fonction de la racine carrée du rapport entre le module d'élasticité et la masse spécifique de la corde. C'est ce qu'exprime la formule :

$$N = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

où N est la fréquence longitudinale, E le module d'élasticité et ρ la masse volumique (ex. " densité "). Bref, cette fréquence longitudinale est fonction de la

longueur de la corde et du matériau utilisé. Comme elle intervient nécessairement dans la vibration complexe réelle d'une corde dans la "sonorité" d'une corde isolée, on sait sur quels paramètres physiques il faut jouer pour amener cette fréquence longitudinale là où elle est intéressante du point de vue de la "sonorité" de la corde.

- la vibration de torsion. Lorsqu'on pince la corde, en particulier avec le "gras du doigt", on amorce nécessairement une certaine torsion de la corde; lorsque celle-ci est libérée, il apparaîtra donc une vibration de torsion dont les paramètres physiques sont bien définis; la fréquence sera inversement proportionnelle à la longueur, et fonction de la racine carrée du rapport entre le coefficient de rigidité par la masse volumique ("poids de l'unité de volume"). On peut donc agir sur cette vibration de torsion en jouant sur les paramètres en présence.

$$\text{On a : } N_r = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

où N_r est la fréquence de torsion et G le module de rigidité de la corde.

- La vibration d'octave. La théorie élémentaire admet que les points de fixation des extrémités d'une corde sont fixes. Dans un instrument de musique c'est évidemment une vûe de l'esprit... La vieille expérience de RAMAN a montré que si une corde vibre transversalement, elle tire une membrane (fixée à l'une de ses extrémités) avec une fréquence double de la fréquence propre de la corde. Si un objet matériel (membrane, table de guitare, cheviller des cordes, manche etc...) est fixé à l'extrémité d'une corde, cet objet vibrera donc à l'octave de la corde !

En fait, ces quatre modes vibratoires coexistent, et du fait que les "degrés de liberté" des points de fixation varient selon les dispositions réalisées par le luthier (raideur des tables, du manche etc...), on peut comprendre pourquoi les vibrations réelles des cordes d'une guitare, en jeu normal, représentent un phénomène d'une complication inouïe. Il n'en reste pas moins qu'on connaît les variables matérielles en présence, celles sur lesquelles le fabricant de "moteurs" (de cordes) peut agir. Et, surtout, on peut dès lors envisager des expérimentations pratiques de combinaisons de filage de cordes, en connaissance de cause, et sachant dans quelle direction il faut varier les paramètres matériels pour aboutir à un résultat désiré. La physique seule est incapable de décider de ce qui est désirable. Pour le savoir il faut nécessairement passer par l'usager; il faut demander à un "bon" guitariste de dire, par essais pratiques, si tel ou tel type de corde est "bon" ^{ou son}. Sachant cela, le fabricant peut alors "reproduire" le modèle jugé optimal, et (ou) éventuellement le modifier dans le sens que lui indiquera tel musicien, en agissant sur les paramètres qu'il connaît et maîtrise.

Tout cela montre que la corde est un moteur au fonctionnement au moins aussi compliqué que celui d'un moteur d'automobile ou d'avions !

Ces quelques éléments sur les cordes étant connus, il est bon, également, d'avoir quelques idées claires sur le fonctionnement de la caisse.

- 2°) LA CAISSE : SYSTEME "RESONATEUR". Le mot "résonateur" ne doit pas être pris au sens usuel du terme - qui possède d'ailleurs toutes sortes de définitions. Il vaudrait mieux dire "système sonore", ou "système résonant", ou, mieux encore, tout simplement "corps sonore". On ne peut pas davantage parler de "système amplificateur", car, en fait, l'énergie fournie à une guitare n'est pas "amplifiée" par le corps sonore (elle ne peut que diminuer du fait des frottements matériels). Cette énergie est simplement "transposée", "déformée" par la caisse. Le mécanis-

me est aisé à saisir. Si on tend une corde de guitare entre deux étaux très rigides, la corde, pincée en l'écartant de sa position d'équilibre d'une certaine distance, vibrera très longtemps. Mais la surface efficace de la corde, agissant sur l'air avoisinant pour le faire vibrer, est évidemment très faible. Dans ces conditions l'amortissement de la corde sera long. Mais si la corde communique le mouvement à une grande surface, celle d'une table de guitare, par exemple, il est évident que la même quantité d'énergie sera dissipée beaucoup plus vite. Bref, la caisse consomme la quantité d'énergie disponible au départ beaucoup plus rapidement que la corde toute seule. Ceci veut dire que le son sera plus bref mais plus intense; c'est une simple question de répartition d'une énergie donnée dans le temps. Et l'un des problèmes importants de la guitare consiste justement à répartir l'énergie disponible de telle façon que le son ait une durée considérée comme optimale et musicalement intéressante, la "bonne guitare" transportant l'énergie vibratoire dans la région où l'oreille est la plus sensible. A énergie égale, le son sera alors de durée optimale et d'intensité perçue maximale.

Ceci étant précisé, il est évident qu'il faut considérer à présent la manière dont l'énergie disponible est répartie entre les quatre modes vibratoires transmis à la caisse. Pour cela il faut se rappeler que les forces (statiques et dynamiques) sont appliquées, dans la guitare classique, en deux points : au chevalet et au chevillier du manche (fig.1). La traction totale des cordes est considérable : entre 50 et 80 kg pour des cordes classiques (plus du double pour les cordes métalliques). Le chevalet, sous l'effet de cette traction a tendance à basculer autour d'un point quasi-fixe: Z. B se relève, C s'enfonce; on observera aisément les effets de ces forces : les tables de guitare sont souvent déformées, se soulèvent derrière le chevalet, s'abaissent devant. Il va sans dire que si la corde se met à vibrer, le chevalet sera soumis à des efforts de rotation alternative autour du point Z, tant du fait de la vibration d'octave (effet Raman), que des vibrations longitudinales. D'autre part, les vibrations torsionnelles de la corde feront osciller plus ou moins le chevalet dans le sens de la largeur de la table. En fait, le chevalet d'une guitare est le siège d'une vibration complexe tout à fait difficile à analyser, d'autant plus qu'elle est largement déterminée par la façon de pincer la corde (ongle, gras du doigt etc...). Mais ce n'est pas tout encore.

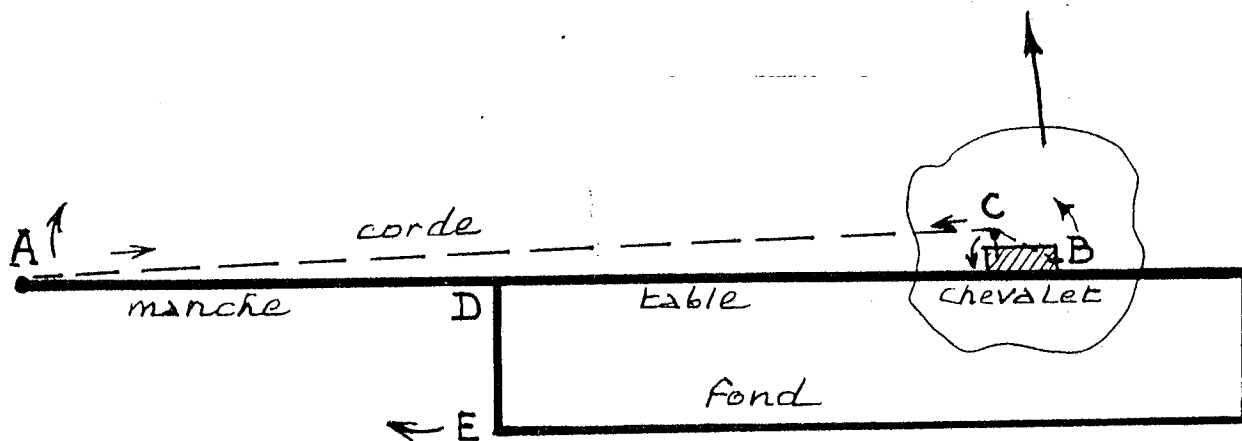
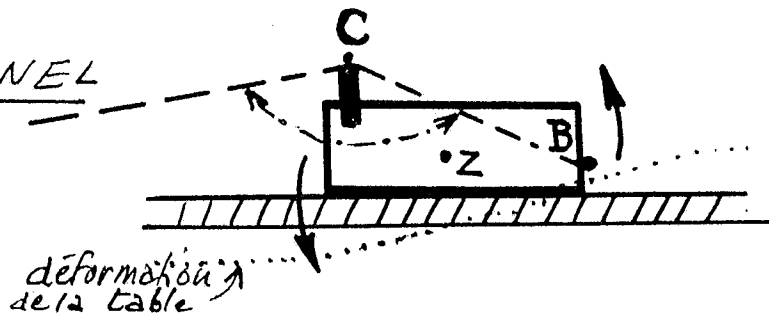
Il est clair que le point de fixation sur la cheville (A) n'est pas un point fixe. Sa mobilité, son degré de liberté, dépend à la fois de la raideur (grosceur du manche, qualité de bois) et du rapport AD/AE (longueur du manche sur hauteur des éclisses). Les vibrations d'octave et longitudinales agiront donc sur le point A et feront vibrer le manche, tout en "tirant" sur le fond au point E. Le degré de liberté de ce point E est évidemment fonction de l'architecture de la caisse, de la nature du bois du fond, des épaisseurs, et en particulier de la forme de la surface du fond (E E'). Si le fond est plat, le degré de liberté de E sera faible; si le fond est bombé, serait-ce légèrement, il va se mettre à "flamber" et le degré de liberté de E sera beaucoup plus grand.

Il est clair, de même, que si la table elle-même n'est pas plane, mais bombée, tout se compliquera encore de ses vibrations de flambement. Et l'amplitude de cette vibration de flambement dépendra encore des barrages (internes) de la table.

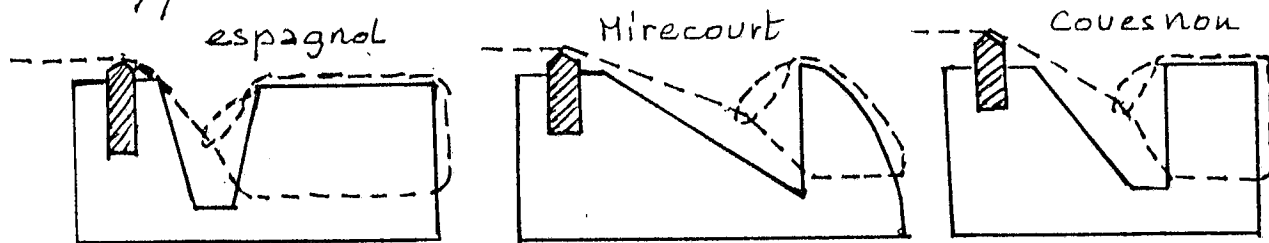
Ces quelques observations montrent l'extrême complication de la "mécanique vibratoire" d'une guitare, en raison, en particulier, du grand nombre de variables en cause; toutes couplées les unes aux autres. La physique de la guitare (statique et dynamique) est un problème soluble par la mécanique classique; mais il ne faut se faire aucune illusion quant à la simplicité des équations en présence... Ce que nous pouvons simplement tenter ici, c'est de faire saisir l'importance de cette complication, et de proposer une vue d'ensemble des mécanismes en cause. Cette vue d'ensemble est indispensable pour comprendre les difficultés avec lesquelles sont aux prises les fabricants de cordes et de guitares. Pour moi, elle s'est lentement élaborée en observant ce que faisaient le luthier, le fabricant de cordes, le guitariste. Elle m'a permis d'aborder un certain nombre de recherches sur la guitare, dont je vais maintenant résumer l'essentiel.

Fig. 1

SCHEMA FONCTIONNEL
DE LA GUITARE



La guitare classique est soumise à des forces venant de la tension des cordes. Pour cet instrument, la tension totale varie entre 55kg et 80kg environ. La répartition de ces efforts dépend de l'angle des cordes (ACB), qui varie avec les luthiers, en fonction du type de chevalets - dont voici 3 modèles :



- d'après Ch. Maillot -

L'angle des cordes varie selon le cas...
La "sonorité" aussi!

IV. MES RECHERCHES SUR LA GUITARE

Elles comportent deux volets distincts, mais liés. Le premier est celui des cordes harmoniques pour la guitare, le deuxième est celui de la lutherie et de l'acoustique de l'instrument lui-même.

1°) LES CORDES DE GUITARE. Comme il a été précisé plus haut, ce sont les incitations de Charles MAILLOT qui m'ont permis d'étudier cette question. Tout en mettant à ma disposition le matériel de recherche acoustique alors disponible, Charles MAILLOT avait accepté que je vienne à son usine, à Lyon, plusieurs années de suite, pour apprendre d'abord à filer des cordes. Ensuite, il m'a fait parvenir un tour à filer... Je pus donc faire à loisir des essais variés de filage de cordes de guitare, en jouant précisément sur les paramètres physiques des cordes précédemment signalés. Nous avons ensuite des " essayeurs ", pour formuler des jugements " subjectifs " sur les cordes : M. LAGOYA fut l'un des plus illustres!... Le problème essentiel, dès le départ, était de trouver une méthode objective permettant de justifier, sur documents acoustiques, les avis subjectifs des usagers des cordes. Cette méthode s'est cristallisée sous l'aspect d'une " fiche caractéristique " des cordes. Cette fiche comportait toutes les données descriptives des matériaux employés, ainsi que les données acoustiques déterminées dans les conditions d'emploi : longueur, fréquences transversale, longitudinale, torsionnelle etc...; durée d'amortissement des cordes fixées soit sur sonomètre, soit sur un instrument expérimental (construit par FRIEDERICH pour les besoins de la cause). D'autres paramètres particuliers étaient inscrits sur cette fiche : allongement de la corde, dans le temps, durée de cette stabilisation, etc... Une étude systématique des modifications dans le temps de certaines variables fut entreprise (fréquence longitudinale par exemple) : la corde restait tendue sur un sonomètre sans que l'on n'y touche pendant 1 jour, 8 jours, un mois, un an... Il est évidemment impossible de donner ici le détail de toutes les expériences qui furent faites pendant 15 ans, de tous ces relevés - souvent fort fastidieux, de tous les essais de matériaux et de traitement de ceux-ci, de tous les essais de filage etc.. Que l'on sache simplement que, petit à petit, la " fiche caractéristique " a permis de définir objectivement les conditions nécessaires pour faire une " bonne " corde satisfaisant tels usagers, moyennant des modifications des variables en présence. La corde " idéale " ne peut évidemment exister : les instruments ne sont pas tous les mêmes, ni les conditions d'écoute, ni les goûts individuels, ni l'oreille de tous les guitaristes. La fiche caractéristique impliquait bien entendu des moyens objectifs de contrôle. Ceux-ci trouvés, on savait sur quels paramètres agir pour obtenir tel ou tel résultat sonore (précisé par les artistes, dans leur terminologie). Les moyens proprement acoustiques (analyseurs, enregistreurs) pour vérifier le bien-fondé des hypothèses de départ sur le fonctionnement des cordes, n'arrivèrent que plus tard grâce à l'AFIMA (Association Française des fabricants d'instruments de musique et d'Accessoires) et... au laboratoire de Mécanique de la Faculté des Sciences (Professeur SIESTRUNCK), qui me prêta de bonne heure le matériel qui me manquait. L'appareillage dont je disposais alors allait me permettre de m'intéresser aux problèmes spécifiques du " corps sonore " de la guitare et de son " rayonnement " acoustique.

2°) LE CORPS SONORE DE LA GUITARE. L'extrême complication des mécanismes de fonctionnement en présence posait bien des problèmes! Les essais que j'aurais voulu faire (table en plexiglass et lumière polarisée) ne se réalisèrent jamais. Par contre, grâce à l'analyseur à bande étroite dont je disposais, il me fut possible de faire, pour commencer, une recherche, dérivée de celles que j'avais faites sur le violon, pour relever la " courbe de réponse " d'une guitare.

De quoi s'agit-il ?

La guitare représente une somme de parties matérielles couplées, dont chacune possède des caractéristiques dimensionnelles et élastiques particulières, se traduisant par une " fréquence propre " de chaque pièce, que l'on peut aisément mettre en évidence, en frappant simplement, à l'aide d'une mailloche appropriée, sur les pièces isolées de leur contexte. A l'oreille on entend parfaitement que chaque pièce " sonne " de façon différente - sans que l'on puisse pour autant analyser les nombreuses composantes acoustiques que comporte un tel bruit de percussion, ni le " traînage " de chaque son.

Si on assemble un grand nombre de pièces (cas d'une guitare) il est certain qu'on peut caractériser de même cet instrument, comparativement à un autre, en le frappant simplement en un point donné (par exemple sur le chevalet). Le bruit produit varie avec chaque guitare.

Pour analyser ce bruit, je disposais à l'époque de l'outillage acoustique suivant : un magnétophone (organisé pour recevoir une boucle magnétique), un filtre à bande étroite (Général Radio) et un enregistreur de niveau. Je fabriquai alors une petite " machine à frapper " permettant de frapper le chevalet de la guitare à coups répétés et réguliers. Les chocs étaient enregistrés sur une bande magnétique dont je tirais une boucle de quelques secondes. Le signal ainsi produit était analysé ; l'amplitude de chaque composante sonore était inscrite : on obtenait la " courbe de réponse " de l'instrument utilisé (fig. 2a). On y voit d'innombrables pointes correspondant à des " résonances " particulières de telle ou telle partie de l'instrument (avec leurs partiels, bien entendu). L'ensemble d'une telle courbe de réponse est tellement compliqué qu'il est bien difficile d'en tirer des conclusions évidentes quant à la qualité sonore de l'instrument (bib.5); j'ai parlé longuement de cette question ailleurs (bib.9 : bulletin GAM n° 89). Il est certain que la courbe de réponse est caractéristique, et différente pour chaque instrument (si le mécanisme et le point d'excitation sont identiques, bien sûr!). Mais il est non moins certain que lors du jeu normal d'une guitare, beaucoup d'autres facteurs interviennent encore, qui échappent à cette courbe de réponse, D'où l'intérêt de chercher d'autres méthodes d'investigation complémentaires.

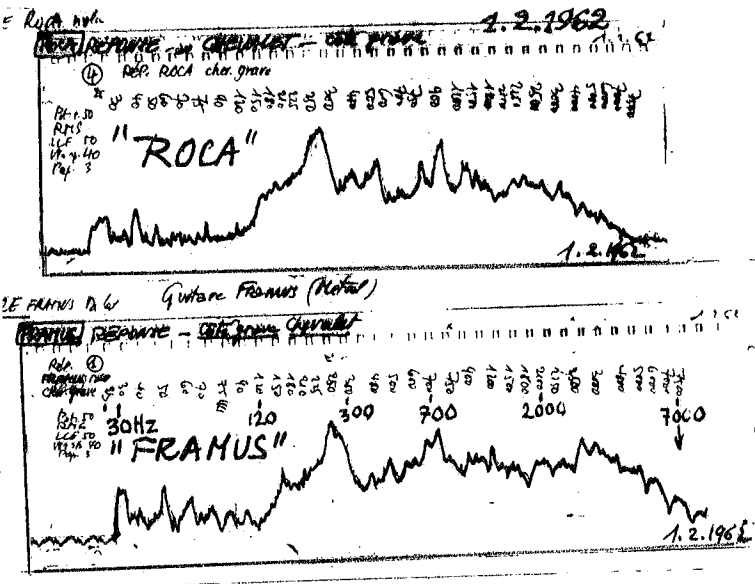
Le sonographe arriva à point dans mes recherches ! En effet, la courbe de réponse classique (fig. 2a) en décibels-hertz ne fournit aucune indication temporelle. Or, l'expérience montre que ce qui caractérise une guitare lorsqu'on l'excite par des chocs sur le chevalet est non seulement la " couleur " du son (fonction des pointes de résonance indiquées par la courbe de réponse en dB/Hz) mais encore la durée pendant laquelle chaque fréquence élémentaire se prolonge. Ces durées sont précisément mises en évidence clairement si on fait un sonogramme des chocs (fig. 2b). En conclusion, pour décrire physiquement la " réponse " d'une guitare il faut deux relevés : le relevé classique et un sonogramme. Avec ces deux documents, pour peu qu'on sache les interpréter, on dispose d'informations intéressantes sur la " qualité " sonore de l'instrument. La méthode des chocs analysés au sonographe permet évidemment d'étudier l'instrument complet, mais aussi des éléments isolés : table, fond, éclisses, etc..; en prenant des tables de mêmes dimensions, mais de bois différents, on peut aussi étudier l'influence de la qualité des bois sur la sonorité finale (on trouvera un exemple plus loin.)

Le sonographe, cependant, ne permet d'analyser qu'un petit nombre de sons - en jeu normal, il est vrai. Il était intéressant d'utiliser un " analyseur " permettant de visualiser aussi la " sonorité globale " d'un instrument; celle que l'on apprécie lorsqu'on a fini d'écouter une pièce complète, et qui découle de l'écoute à long terme. Un tel analyseur n'existant pas dans le commerce, il m'a fallu en définir le " cahier de charges ". Un de mes amis (M. SOLE) me construisit alors un " modèle sur table ", et le Laboratoire d'électronique de la " MECANIQUE " (Professeur SAPALY) construisit à partir de ce prototype un appareillage opérationnel, l'IDS, un " Intégrateur de densité spectrale. Cet appareil fournit un diagramme dont l'allure traduit bien la " sonorité globale " d'un instrument - ou d'une chaîne haute-fidélité (bib.3), ou d'une salle (bib.4). Pourquoi ne pas utiliser l'IDS pour compléter les informations acoustiques sur la qualité sonore d'une guitare, apportées par le sonographe ? Une série d'expérimentations faites chez FRIEDERICH allait montrer tout l'intérêt tant du sonographe que de l'IDS... Revenons donc à quelques unes de ces expériences.

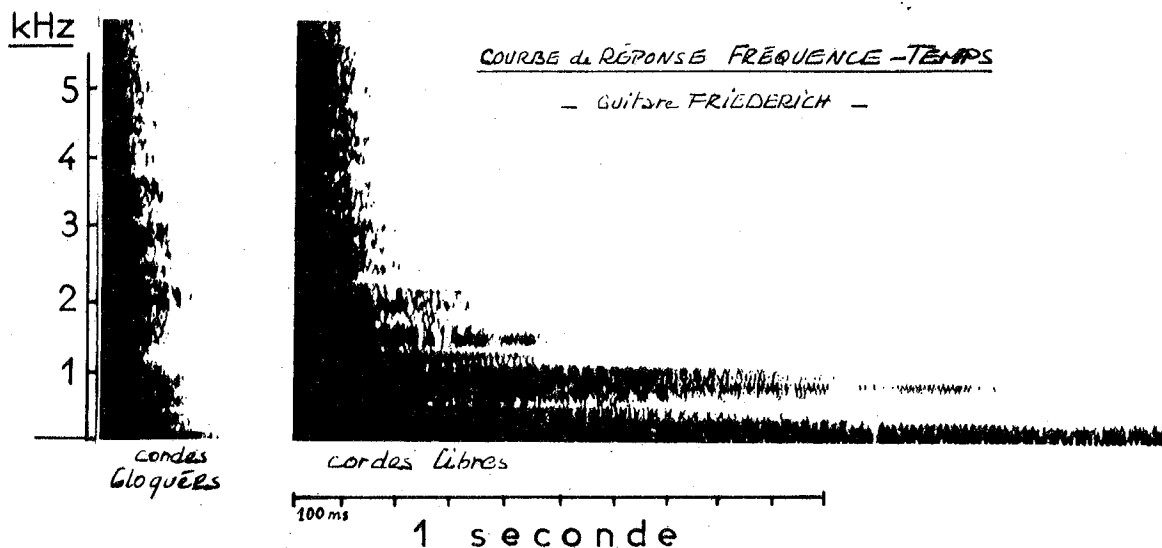
fig 2

a. Courbes de Réponse de deux guitares
(LEIPP - 1962)

On a relevé, par la méthode classique (boucle magnétique + filtre passe bande) la courbe de réponse d'une guitare ancienne (ROCA) et d'une guitare récente (FRAMUS). Les pointes de résonance sont visiblement réparties autrement.



D'où nécessairement des différences dans les spectres rayonnés. Mais le plus important n'apparaît pas dans ce genre de courbes de réponse, à savoir le temps. La "sonorité" d'une guitare est largement appréciée à travers la durée pendant laquelle sonne une corde qu'on vient de pincer. D'où l'intérêt de la courbe de réponse fréquence - temps, que le sonographe permet de visualiser (ci-dessous).

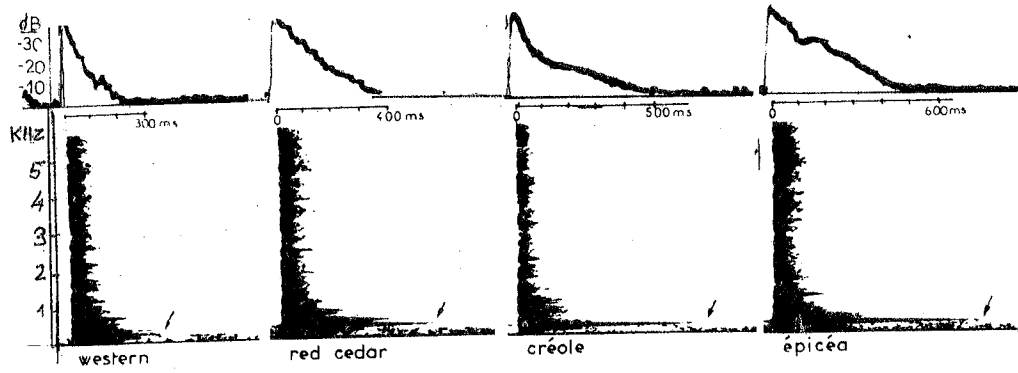


b. On lit ici le "trainage" d'un choc sur le chevalet, cordes bloquées ou libres. Ce diagramme complète le précédent.

Fig. 3

GUI-TARE et SONAGRAPHIE.

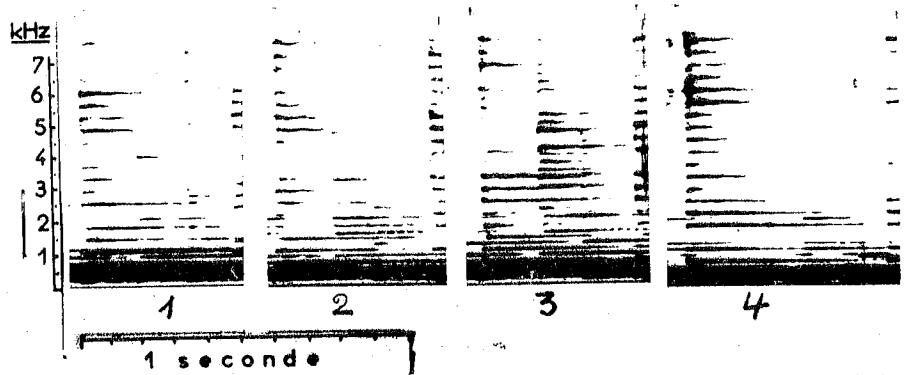
a.)



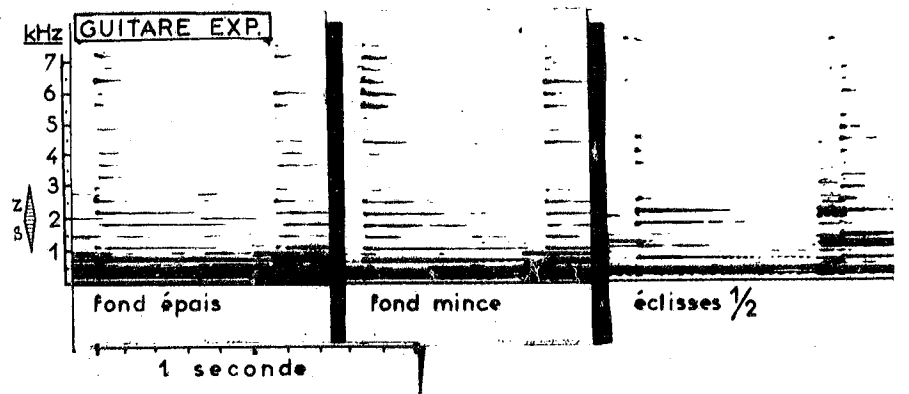
4 Tables de Bois différents ont été excitées par chocs au même point. Les sonagrammes ont été classés par durée de trainage de la raie ultime. Les enregistrements de niveau montrent à quel point les courbes d'extinction du son diffèrent...

b.) Sonagrammes du même passage musical dans divers cas :

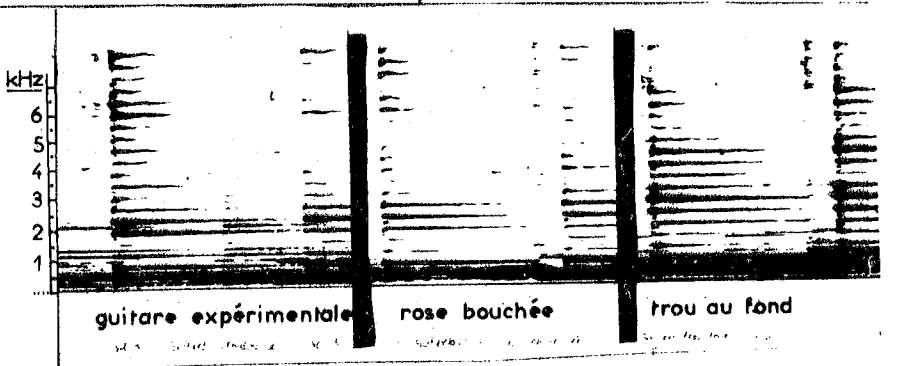
— pour 4 guitares différentes



— On modifie certains paramètres matériels...



— Le rôle acoustique de la rose est mis en évidence



V. QUELQUES EXPERIENCES ACOUSTIQUES SUR LA GUITARE

Il fut décidé avec FRIEDERICH de faire un certain nombre d'expériences sur des guitares, destinées à apporter de la lumière sur des points de technologie de fabrication de l'instrument au sujet desquels on ne disposait que de résultats subjectifs, difficiles à formuler. Les opérations étaient réglées de la façon suivante. FRIEDERICH allait fabriquer une guitare expérimentale avec des bois donnés. Pour commencer on testera les bois en présence. Puis l'instrument sera construit, et on procédera à un certain nombre de tests acoustiques, comportant d'une part des artefacts (chocs sur le chevalet, sons à vide, gammes, etc...), et d'autre part du jeu normal (une pièce de musique exploitant au mieux toutes l'étendue de l'instrument). Artefacts et pièce normale furent enregistrés chaque fois strictement dans les mêmes conditions de local, de distance etc... et c'est le même guitariste qui jouait les échantillons sonores et la pièce de musique. Les enregistrements, normalisés, étant faits, on modifiait une partie de l'instrument, et on recommençait les mêmes tests sonores. Les analyses au sonographe et à l'IDS étaient ensuite dépouillés au laboratoire.

Voici à titre d'exemple quelques uns des essais qui ont été ainsi réalisés, et dont les résultats présentent un intérêt indéniable.

1°) ESSAIS AU SONAGRAPHE.

Nous présentons souvent des sonagrammes au GAM : ceux-ci se passent presque de commentaires....

Figure 3a : Il s'agit d'un test de bois. Les échantillons ont les mêmes dimensions (tables ébauchées). Le premier bois ("western") étant pris comme référence, on vérifie que le 2° échantillon ("créaole") a une allure très différente. Le bruit du choc est plus bref dans toute la partie aiguë; par contre on note une résonance grave (voisine de 200 Hz) qui se prolonge très longuement. Le 3° échantillon (Red Cedar) a un spectre beaucoup plus fourni, qui s'amortit nettement moins vite, et on note des résonances intenses qui se prolongent longuement dans la région située entre 200 et 300 Hz. Le 4° échantillon, enfin, (épicéa), le plus "noble" au dire de Friederich, présente effectivement un spectre bien garni, avec des pointes de résonance notables jusque vers 1200 Hz. Rappelons ici, incidemment, que j'ai mis au point naguère une méthode permettant de mettre en évidence, par manipulations photographiques, les parties communes et les parties originales de chacune des "images" en question. (GAM n° 68 : IMAGES et TRAITEMENT d'IMAGES). Cette méthode permet de dépouiller les documents fournis par le sonographe.

Figure 3b : On y trouve le même passage musical, joué sur quatre guitares différentes. Pour chaque note, il est aisé de relever les différences spectrales, tant du point de vue des intensités relatives des harmoniques que de leur "traînage". On observera un point intéressant : la dernière guitare a un fond en contreplaqué! On notera les différences extraordinaires des spectres (filtrage de la note grave, richesse spectrale dans le suraigu... toutes caractéristiques qu'on retrouve subjectivement à l'audition.

Figure 3c : La même séquence de notes d'un passage musical est enregistrée sur la même guitare, mais on en a diminué fortement l'épaisseur du fond pour le deuxième essai. Le troisième essai met en évidence les modifications spectrales obtenues quand on diminue les éclisses de moitié. En comparant les notes homologues des trois sonagrammes, et en procédant parallèlement à l'écoute des échantillons enregistrés avec cette guitare expérimentale, on vérifie tout l'intérêt du sonagramme en tant que visualisation des sensations sonores.

Figure 3d : Ce sonagramme montre la guitare expérimentale, d'abord dans son état normal. Puis on bouche la rose à l'aide d'une plaque de bois : les altérations spectrales sont considérables, elles le deviennent encore bien davantage lorsqu'on ouvre un trou dans le fond. Chaque fois, toute la répartition d'énergie dans les spectres est modifiée....

Nous avons fait ainsi de nombreuses expériences avec FRIEDERICH. L'interprétation des sonagrammes en fonction de l'audition est toujours possible, pour peu que l'on soit entraîné à leur dépouillement. Mais même pour un non spécialiste, l'allure générale des sonagrammes suffit pour constater les modifications pro ondes des spectres lors des modification de l'instrument.

Mais le sonagramme ne couvre qu'un empan de quelques secondes : il ne permet que de porter un jugement objectif ponctuel, correspondant à l'écoute d'ordre proche, où l'on observe la forme des sons et ses détails. Or il existe un deuxième type d'écoute, que j'appelle d'ordre lointain; où notre système auditif porte un jugement global sur la " sonorité " d'un instrument après écoute d'une pièce complète de musique. C'est pour simuler cette écoute d'ordre lointain que j'ai imaginé la méthode d'intégration de la densité spectrale,

2°) ESSAIS A L'INTEGRATEUR DE DENSITE SPECTRALE (IDS)

Rappelons sommairement de quoi il s'agit. On joue sur une guitare une pièce complète et on relève, à l'aide de l'IDS, la répartition statistique de l'énergie dans l'aire audible (50 à 15 000 Hz), préalablement découpée en 8 " bandes sensibles ". On apprécie ainsi, en pourcentage, la répartition de l'énergie entre l'aigu et le grave, bref, la " balance " entre basses, grave, médium grave, médium, médium-aigu, aigu, suraigu, hyperaigu apparait clairement. L'expérience a montré que les diagrammes obtenus étaient hautement significatifs de la sonorité globale d'une guitare.

Comparons par exemple 3 guitares fabriquées par FRIEDERICH (fig.4). On voit bien que ces trois instruments, jouant la même pièce dans les mêmes conditions, n'ont pas du tout des balances identiques, quoique l'allure générale soit la même (alors qu'elle diffère totalement pour d'autres instruments)....

Autre exemple. Comparons une guitare normale avec la guitare expérimentale (à fond très mince). On vérifie (fig.5) que pour le fond mince, la pointe maximale s'est déplacée vers le médium et que les basses se sont gonflées : la sonorité a changé...

Comperons encore la guitare expérimentale lorsqu'elle avait un fond épais (en pointillé), avec ce qu'est ^{devenu} le même instrument lorsqu'on amincit le fond (fig.6). La balance sonore change tout à fait, et la correspondance avec la " sonorité " subjective est évidente : l'interprétation de ces diagrammes est aisée pour qui a de l'oreille.

La figure 7 montre les modifications de balance lorsqu'on bouche la rose à moitié... A l'oreille, les différences de sonorité sont considérables; le diagramme IDS met bien en évidence le rôle de la section de la rose !

En diminuant enfin les éclisses de moitié, (fig.8) les différences sautent aux yeux : l'instrument perd considérablement ses basses et gagne partout ailleurs. La guitare reste une guitare, mais sa sonorité devient plus claire, moins "grave"

Bref, l'IDS nous apporte bien les informations complémentaires qui manquaient au sonagramme. Ainsi l'IDS et le sonographe sont vraiment les appareils de base, permettant de concilier les jugements subjectifs avec les diagrammes objectifs !

DIAGRAMMES de DENSITÉ SPECTRALE INTÉGRÉE

La "sonorité" globale d'une guitare est fonction de la répartition statistique de l'énergie acoustique dans l'aire audible. Celle-ci est découpée en 8 bandes sensibles: basses, grave, médium-grave, médium, médium-aigu, aigu, suraigu, hyperaigu. L'IDS donne des diagrammes significatifs de la "balance" spectrale, de la "sonorité".

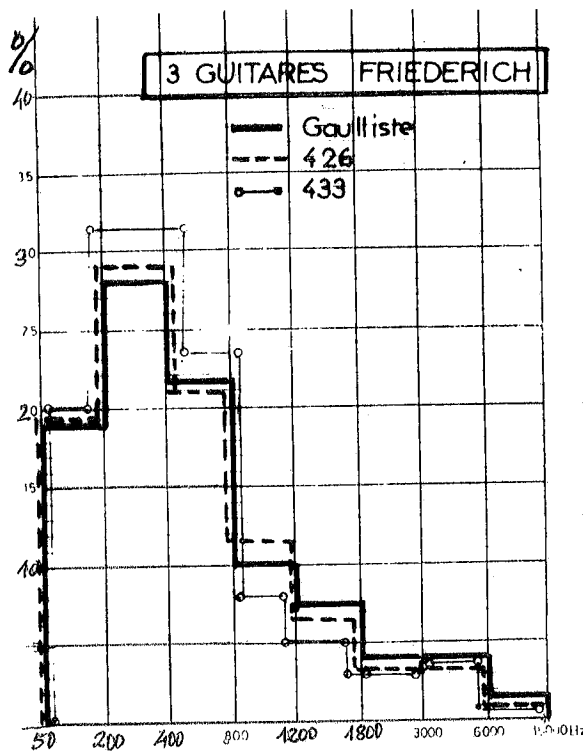


Fig 4) Trois guitares de FRIEDERICH

comparées du point de vue de leur sonorité globale. Les diagrammes se raccordent bien avec la sensation auditive: la guitare 433 est plus "grave", moins "claire" que les autres etc... ce qui se voit sur les diagrammes.

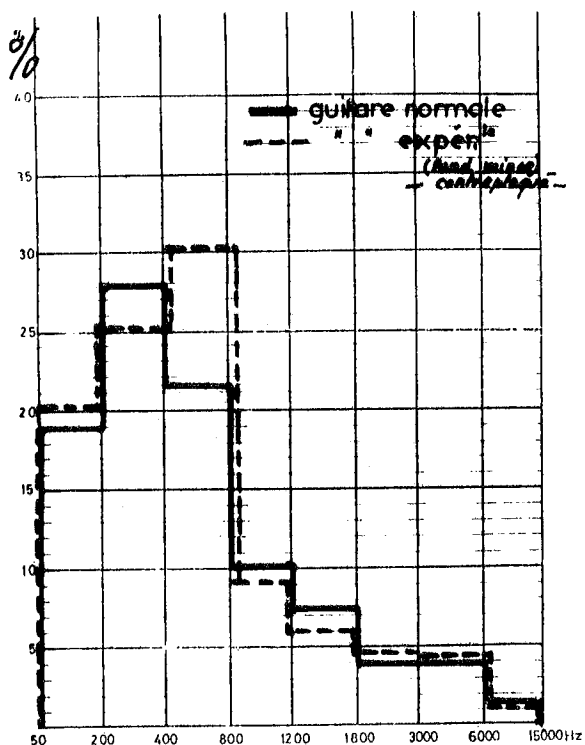
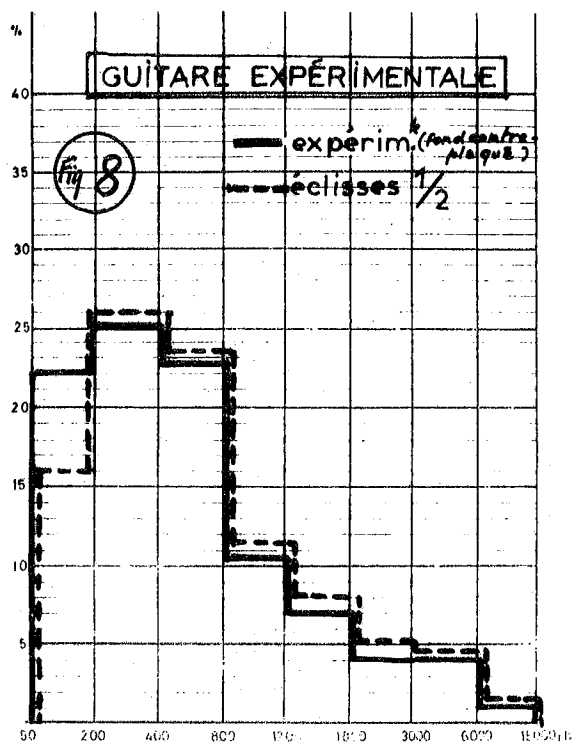
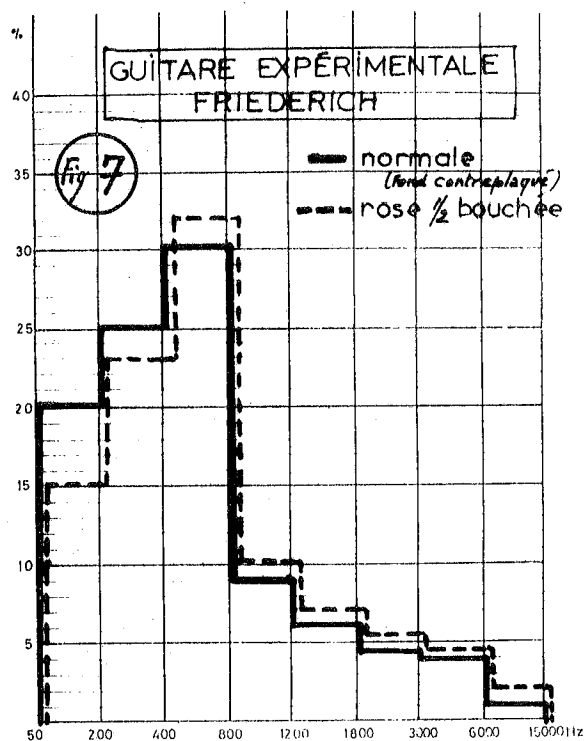
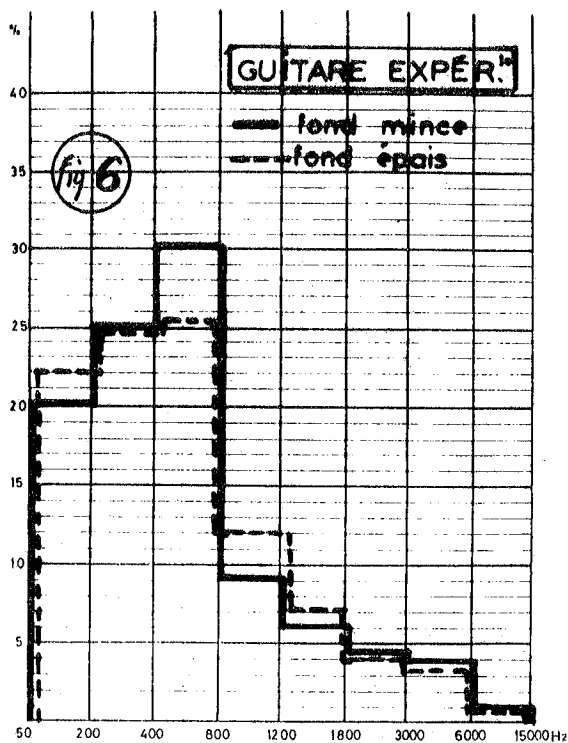


Fig 5) Guitare normale et guitare expérimentale à fond mince.

Le décalage entre les deux instruments est bien net: la bande principale glisse vers l'aigu... la sonorité aussi!

LUTHERIE EXPÉRIMENTALE et IDS.

L'IDS permet d'objectiver les modifications de sonorité en lutherie expérimentale. Les trois diagrammes ci-dessous se passent pratiquement de commentaires !



Un point important reste à préciser. Pour interpréter les avis des guitaristes et des auditeurs relativement à la qualité d'une guitare, il est indispensable de connaître l'oreille qui écoute... Rappelons que nous avons construit pour cela un appareillage très efficace, le TFT (test fréquence-temps) que nous avons décrit ailleurs (bib.6). On a donc en mains tous les moyens pour objectiver le rayonnement acoustique d'une guitare et justifier les jugements subjectifs de qualité.

Je voudrais rajouter à cela quelques autres considérations relatives à la lutherie expérimentale dans le domaine de la guitare, et qui sont susceptibles d'être utiles à ceux qui s'intéressent à la recherche scientifique expérimentale sur cet instrument.

3°) QUELQUES POINTS DE LUTHERIE EXPERIMENTALE SUR LA GUITARE.

a) Interférométrie . Dès après la guerre de 1940, les écrans polarisateurs de la lumière firent leur apparition et furent utilisés à diverses fins, en photographie en particulier, pour "effacer" les reflets gênants sur du verre, du vernis etc. Mais la lumière polarisée fut rapidement utilisée pour mettre en évidence des phénomènes invisibles à l'oeil nu, par exemple les contraintes existant dans un objet soumis à des déformations : les "lignes de force" devenaient enfin visibles ! L'apparition de ces moyens nouveaux m'avait conduit à envisager la fabrication d'une table de violon et de guitare en plexiglass, afin d'étudier la répartition des contraintes dans une table ou dans un instrument. Car tous les instruments à cordes subissent des efforts, des contraintes, qui conduisent à des déformations altérant graduellement leur sonorité. Ces déformations sont bien connues des fabricants de guitares, demandez donc à FRIEDERICH s'il n'a pas fait à ce sujet des observations sur ce qui se passe au voisinage des chevalets ! Pour empêcher ou limiter ces déformations, on dispose de plusieurs remèdes. On peut choisir des bois à modules élastiques élevés et dont la déformation permanente soit faible; on peut disposer de barrages plus nombreux et plus "forts", augmenter les épaisseurs des tables etc... Mais il serait évidemment important d'étudier au préalable les phénomènes par interférométrie. Ceci permettrait de répartir les forces en présence de façon optimale, d'éviter les déformations permanentes (donc les pertes de sonorité). En fait, toute l'étude de la statique de la guitare reste à faire, car mes projets avortèrent faute d'avoir trouvé les moyens d'étude à l'époque.

b) Guitare expérimentale . Voici une autre tentative avortée! Sur ma suggestion, le facteur de pianos KLEIN avait accepté l'idée, voici bien longtemps, de fabriquer une "guitare" expérimentale. Sa caractéristique essentielle était d'avoir une ouverture latérale de surface réglable, assez grande pour laisser passer la main, ce qui permettait de raboter les barres pour des essais. De même on pouvait disposer une "âme" mobile, réglable, dans l'instrument. Le but était de voir si cela ne permettait pas, par hasard, d'améliorer ou d'étendre la sonorité de la guitare. L'instrument n'a jamais été terminé. La caisse existe : il suffirait de monter le manche et les chevilles. Je crois qu'on pourrait faire, à l'aide d'un tel instrument, des expérimentations intéressantes, doublées de recherches acoustiques (sonagrammes, diagrammes IDS etc...)

c) Rôle de la salle dans la "sonorité" de la guitare. La salle est une partie intégrante de l'instrument de musique, et conditionne largement sa sonorité. Tout le monde le sait ! Mais étant donné qu'on dispose à présent d'enregistreurs magnétiques de haute qualité, et d'appareils adéquats pour analyser la sonorité, je pensais (en 1965!) qu'il était raisonnable de penser à faire quelques essais "pour voir". Incidemment, on pourrait tenter d'objectiver la différence entre ce qu'entend le musicien exécutant dans une salle, et ce que perçoit l'auditeur. Cette idée me poursuit depuis longtemps : elle revient tout à fait à l'actualité dans les recherches acoustiques que je développe à FONTEVRAUD (bib.9)), et je signale qu'une série de manipulations sur le terrain, dans les conditions d'emploi est prévue

avec le violoniste CALAME. Les résultats de telles recherches sont évidemment d'importance. En effet, l'expérience montre que le musicien règle son jeu (timbre, tempo etc...) selon le local où il se trouve. Si ce qu'entend l'exécutant diffère beaucoup de ce qu'entend l'auditeur placé dans une salle, il est évident que si le résultat semble optimal à l'exécutant, il ne peut l'être pour l'auditeur. Or en concert, c'est celui-ci qu'il s'agit de satisfaire.

Convaincu depuis longtemps de l'intérêt de cette affaire, nous avons donc demandé à utiliser la salle de l'Ecole Normale de Musique de Paris (qui est une excellente salle pour le quatuor, la guitare solo etc...), et FRIEDERICH apporta plusieurs guitares, qui furent jouées par un guitariste professionnel, dans les conditions d'emploi normales. Deux pièces significatives, couvrant toute l'étendue de l'instrument furent choisies : une lente, grave; une rapide. Ces pièces furent enregistrées d'abord au niveau de l'oreille du musicien, puis en divers points particuliers de la salle (en avant et en arrière du parterre; au balcon etc... Quelques sonagrammes tout à fait intéressants furent tirés. Voici l'un d'eux (fig.9) où la même guitare (FLETA) fut enregistrée simultanément à 1 mètre du musicien et au fond de la salle. On voit sur ce document les relevés de densité spectrale corrélatifs; il est remarquable que la balance spectrale, la "sonorité" de la guitare est très peu altérée par la salle; ce qui confirme que cette salle de concert de l'Ecole Normale de Musique de Paris est une salle extraordinaire pour la guitare,

Ceci présente un avantage important : le musicien entend en fait la même sonorité que son auditeur ^{place} à distance; il peut donc régler son jeu de façon à satisfaire l'oreille de son auditeur normal. C'est un problème sur lequel j'attire depuis longtemps l'attention : si ce qu'entend le musicien diffère considérablement de ce que perçoit l'auditeur en salle, il est évident, le musicien peut difficilement régler son jeu de façon à satisfaire les auditeurs. Sauf, cas tout à fait intéressant, lorsque l'oreille du musicien filtre et déforme la sonorité de la même manière que ne le fait la salle pour l'auditeur à oreille "normale".....

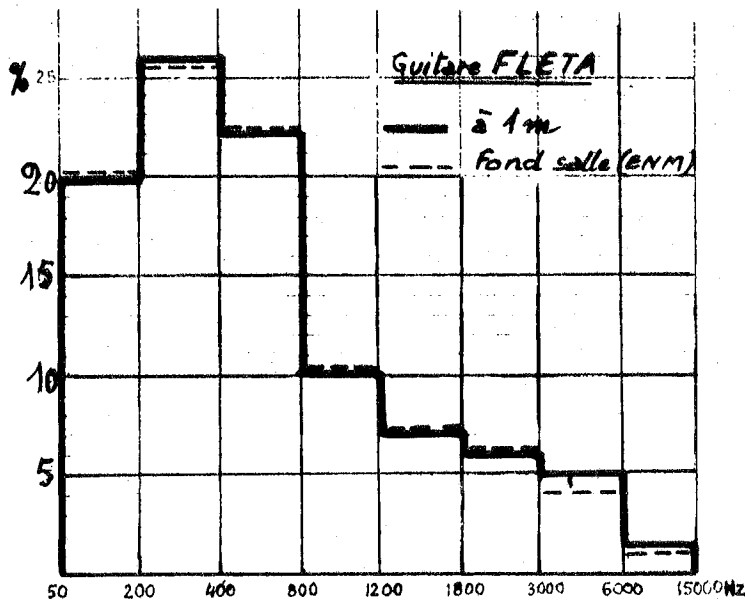
Dans ces conditions, on comprend incidemment pourquoi une guitare qui "sonne bien" pour l'exécutant, n'est pas nécessairement appréciée dans une salle donnée. Voyons un exemple (fig.10). Parmi les essais faits avec FRIEDERICH à l'Ecole Normale de Musique, nous avons fait jouer par le même guitariste les deux mêmes pièces sur 5 guitares différentes : une FLETA, une BOUCHET, une RAMIREZ, la guitare du concours de LIEGE de FRIEDERICH et une guitare que FRIEDERICH venait de terminer. L'allure générale de ces guitares est vaguement similaire : ce sont toujours des guitares... Mais la RAMIREZ et la FRIEDERICH (LIEGE) ont une "pointe de résonance" dans la bande de 1800 à 3000 Hz. (compensée par des basses et du médium-grave légèrement plus faibles que les autres). Il est évident que si une salle filtre fortement la région de 1800 à 3000 Hz, ces deux guitares auront une sonorité plus "pleine", plus homogène que les autres instruments (qui, pour l'auditeur, auront un "trou" dans cette bande de fréquence - perte de "clarté", de "présence" etc...). Pour un concertiste de guitare (comme pour tous les autres solistes d'ailleurs) la salle peut donc fortement servir ou le desservir, éventuellement le discréditer !

Ces deux exemples devraient suffire pour montrer tout l'intérêt d'étudier l'acoustique des salles, leur qualité sonore : - un point sur lequel je reviendrai bientôt. L'intérêt de la méthode de l'IDS est évident; les résultats sont tout à fait confirmés lorsqu'on réécoute "à l'oreille" les bandes enregistrées. A l'époque des essais à l'Ecole Normale de musique (1970), je ne disposais pas de l'outil adéquat pour apprécier cet aspect de la sonorité (l'IDS); mais ces recherches m'avaient précisément stimulé pour rechercher une méthode, imaginer et faire construire l'appareillage nécessaire. Voilà qui est fait! J'ai pu reprendre ainsi les enregistrements faits en 1970 et qui n'avaient été dépouillés qu'à l'aide de sonagrammes.

d) Holographie acoustique. La technique holographique permet de reprendre plus efficacement les problèmes de visualisation des lignes nodales et ventrales chères à CHLADNI et à SAVART... Voici quelques années, on vit effectivement quelques chercheurs s'intéresser à ce problème, en particulier JANSSON et JOVICIE (bib.7 et 8). Le principe

.....

Fig 9



Cette guitare, enregistrée simultanément à 1 m et au fond de la salle, conserve un diagramme de densité spectrale intégrée remarquablement constant: la salle de l'Ecole Normale de musique ne déforme pas la "sonorité" de l'instrument; elle est excellente pour la guitare!

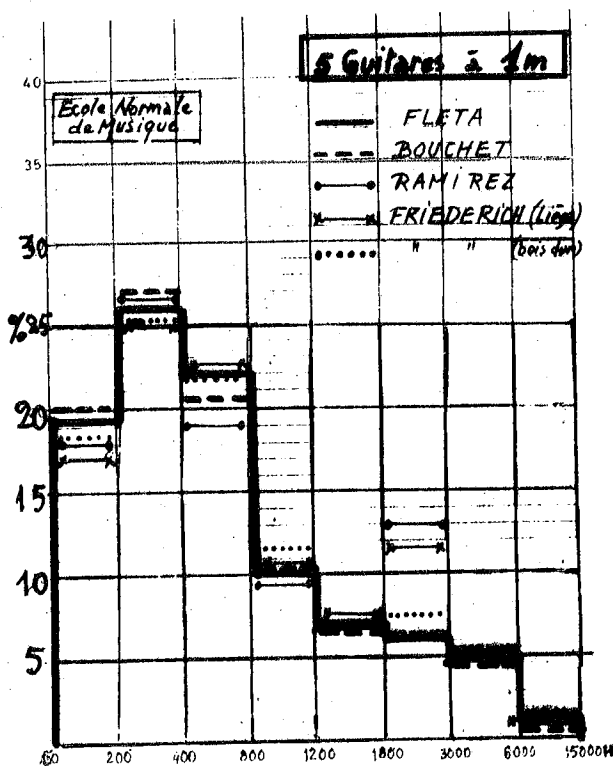


Fig 10 Il s'agit de guitares de maîtres: l'allure des diagrammes est très similaire ... SAUF entre 1800 et 3000 Hz où la guitare de Friedrich ressemblait énormément à celle de Ramirez. Dans une salle qui "filtrerait" cette bande, ces deux instruments seraient plus appréciés que les autres. Ici, l'oreille étant très sensible dans la bande considérée, ces deux instruments "sonnent" mieux!

est simple. On excite une table d'instrument à l'aide d'un moyen électro-mécanique et d'un générateur de basse fréquence. La forme de l'excitation est sinusoïdale. Un dispositif holographique permet de visualiser l'état vibratoire de la table, en particulier, aux diverses fréquences de résonance. Les hologrammes obtenus sont comparables aux " images " obtenues par CHLADNI ou SAVART voici bien longtemps; ils peuvent évidemment apporter des informations sur certains paramètres matériels de la lutherie. On vérifie en effet que les images diffèrent selon le modèle, les barrages, les épaisseurs de la table etc... Mais il est nécessaire de formuler à cet égard un certain nombre d'observations.

Pour obtenir des informations réalistes, il est évident qu'il faudrait exciter la table en pinçant normalement les cordes. Or pour obtenir des hologrammes, il faut une excitation sinusoïdale, périodique, donc un artefact. Comment espérer, dans ces conditions, comprendre les mécanismes vibratoires d'une table, d'un fond, ou d'instrument de musique? Et puis enfin l'observation de ce qui se passe sur une table ne renseigne que sur un point très limité des phénomènes en présence. Le manche de la guitare vibre très fort lors du jeu, ainsi que les éclisses, qui représentent une surface vibrante considérable. Je me suis amusé à calculer approximativement la surface d'un fond de guitare classique. On trouve environ 1300 cm². La table est un peu plus petite, du fait de la présence de la rose soit environ 1250 cm². Or les éclisses représentent quelque 1300 à 1500 cm² soit autant que le fond ! et jouent donc un rôle notable sur la sonorité de l'instrument. Bref, l'holographie apporte des images spectaculaires et impressionnantes, mais on ne peut se faire trop d'illusions quant aux résultats pratiques susceptibles d'en être extraits, dans l'état actuel des choses, même si on en appelle à l'ordinateur.

Quoiqu'il en soit, les quelques éléments que nous avons évoqués ici nous permettent de tirer un certain nombre de conclusions quant à l'intérêt des recherches acoustiques en lutherie de la guitare, et en lutherie en général.

VI. CONCLUSIONS

La science acoustique, dans son état actuel, peut-elle apporter quelque chose en facture instrumentale et en particulier au luthier d'art, au guitarier? Ce qui précède apporte une réponse affirmative à la question. On sait relever la " réponse " d'un instrument, les spectres évolutifs; on sait mesurer les paramètres physiques et sonores des cordes, des bois de lutherie; depuis peu, on dispose du moyen de relever des diagrammes de densité spectrale, très significatifs de la " sonorité " d'une guitare, etc... Mais il est certain que les recherches personnelles, dont je fais état ici sous forme résumée ne recouvrent qu'une petite partie des problèmes soulevés, qui mériteraient d'être étudiés de façon approfondie. Les moyens et la doctrine générale de base servant de fil conducteur existent désormais. Ce qu'on peut déplorer c'est l'absence de curiosité des acousticiens envers les instruments de musique, la non-information des luthiers dans le domaine des possibilités scientifiques de recherche, etc.. leur méfiance envers tout ce qui est " scientifique ". On peut facilement les comprendre ! Les techniques de facture instrumentale sont des techniques " artistiques ", que la science est actuellement bien loin de pouvoir " mettre en équation " intégralement. Ceci tient en particulier au fait de la présence de la " machine à écouter " humaine, à propos du fonctionnement de laquelle on ne dispose actuellement que d'informations lacunaires. D'autre part, il n'est pas douteux que la recherche implique du matériel, mais aussi des chercheurs ! Or si un chercheur veut se lancer par exemple dans l'étude acoustique fondamentale de la guitare, il lui faudra d'abord savoir ce qu'est une guitare, c'est à dire, de préférence, apprendre à bonne source à fabriquer l'instrument. Il lui faudra aussi savoir en jouer ! Oh ! point n'est besoin d'être un virtuose; mais il est utile de savoir se servir de l'instrument; car la " sonorité " d'une guitare dépendant autant de celui qui manie l'instrument que de la caisse sonore proprement dite ! Cette condition étant réalisée, il faudrait évidemment que le chercheur dispose de l'appareillage adéquat. Celui-ci est particulièrement onéreux : un sonographe ou un IDS représentent un débours de quelque 40 ou 50 000 F; sans compter

qu'il faut encore des magnétophones professionnels et d'autres appareillages. Tout cela dépasse les possibilités d'un guitarier ou d'un chercheur " normal ". Si les facteurs d'instruments étaient suffisamment " motivés ", un laboratoire corporatif serait pensable, où chacun, moyennant une participation financière faible, pourrait poser des questions et espérer des réponses réalistes à ses problèmes. Un tel laboratoire fut ébauché naguère grâce à quelques fabricants d'instruments de musique (AFIMA). Mais la conjoncture économique relative aux instruments de musique n'est guère favorable et la facture instrumentale ne représente pas suffisamment d'importance économique pour motiver les instances officielles à la création d'un laboratoire " officiel " d'acoustique instrumentale. C'est sans doute dommage : la France ne peut guère espérer s'imposer sur le marché que par la qualité des instruments de musique fabriqués. Or celle-ci pourrait certainement être améliorée dans beaucoup de cas par l'introduction de méthodes de contrôles acoustiques, en cours de fabrication (fiche caractéristique) et de " test de sonorité ". J'espère avoir montré que ce n'est pas une vue de l'esprit ! Et je signale tout de même qu'au moins un industriel de la musique (fabrique de cordes BABOLAT-MAILLOT-WITT), conscient de l'importance de la recherche, possède désormais un laboratoire avec sonographe et autres appareils, grâce, d'ailleurs, à l'aide du Ministère de l'Industrie et du Commerce. Mais il est certain que la recherche fondamentale systématique sur les instruments de musique exigerait des moyens beaucoup plus puissants et, surtout, des chercheurs compétents en facture instrumentale et en acoustique. Le seul organisme qui dispose actuellement de moyens suffisants est certainement l'IRCAM; mais il faudrait que les responsables aient compris au préalable qu'avant de prétendre réaliser des instruments de musique nouveaux et des musiques nouvelles, il serait extrêmement fructueux d'étudier d'abord ce que les praticiens de la facture et du jeu musical ^{font} depuis un ou plusieurs siècles. ~~Il faudrait~~ ~~d'abord~~ faire une recherche approfondie sur les techniques empiriques, lentement élaborées par des générations de luthiers et de musiciens parmi lesquels beaucoup ont eu des idées géniales, tenant compte à la fois de la machine à faire de la musique et de la machine à l'écouter.

Un avenir proche montrera si ces responsables s'intéressent à l'acoustique des instruments traditionnels, condition sine qua non si on désire faire mieux ou autre chose. Soyons optimistes....

E. LEIPP

24 Septembre 1977

o
o o
BIBLIOGRAPHIE

- 1°) LEIPP (E) - Acoustique et Musique. Masson, Paris (1977) - 2° Edition.
 - 2°) LEIPP (E) et MOLES (A) - L'emploi du sonographe dans la détermination de la qualité des instruments à cordes. Congrès d'Acoustique de Lausanne (1958) in Annales des Telec. Tome 14, 5-6 - 1959) p. 135 sequ.
 - 3°) LEIPP (E) - Evaluation globale d'une chaîne haute-fidélité par analyse d'ordre proche et lointain. Conférences des Journées d'Etude (Festival International du Son, Paris) Ed. Radio, Paris (1977).
 - 4°) LEIPP (E) - Acoustique et Animation : le cas Fontevraud. Bulletin du GAM N° 87 (1976).
 - 5°) MEYER (Jürgen) - Die Problematik der Qualitätsbestimmung bei Musikinstrumenten Instrumentenbauzeitschrift Heft 2. 1977 .
-/

BIBLIOGRAPHIE (suite)

- 6°) LEIPP (E) - Peut-on tester l'oreille musicienne ? Bulletin GAM n° 85 (Mai 1976).
- 7°) JANSSON (E.V.) - A study of acoustical and hologram interferometric measurements of the top late vibrations of a guitar.
Acustica - Vol. 25 n° 2 (1971), p.p. 95-100.
- 8°) JOVICIE (J. et D.) - Le rôle des barres de raidissement sur les tables de résonance de la guitare. Etude holographique.
Acustica - Vol. 38 n° 3 (1977), p. 175 à 185.
- 9°) LEIPP (E) - La courbe de réponse en acoustique instrumentale.
in. Bulletin GAM n° 89 (Février 1977) (à propos de l'enceinte acoustique instrumentale de A. MAS).

DISCUSSION

M. LEBOEUF - J'ai été très intéressé par tout ce que vous avez dit à propos de votre "fiche caractéristique" des cordes, où vous relevez soigneusement les paramètres physiques relatifs aux modes vibratoires de la corde, mais aussi les conditions d'hygrométrie où vous faites les relevés. C'est pour n'avoir pas tenu compte de l'hygrométrie que les facteurs de pianos célèbres, avant de disparaître, ont eu de graves problèmes....

M. LEIPP - Bien sûr qu'avec les bois, les problèmes sont les mêmes; ils sont en fait plus dramatiques : lorsque l'hygrométrie change pour une corde, elle sonne plus mal etc., mais ne casse pas en général. Une table de piano qui a été barrée avec des barres stockées dans un local à hygrométrie différente du lieu de fabrication des pianos, risque de fendre; et c'est ce qui arrive souvent - avec le chauffage central en particulier. J'ai eu l'occasion de parler un peu de ces problèmes avec M. MILLIOZ, le Directeur de l'Usine de pianos (RAMEAU) qui s'est installée récemment à ALES, dans le GARD. Je ne sais si les responsables du choix du lieu ont pris en considération l'hygrométrie et la température - et leurs variations au cours de l'année pour installer l'usine à Alès; mais personnellement, si on m'avait demandé mon avis, j'aurais commencé par là! Pour ce qui est de la recherche scientifique, je crois à l'intérêt d'un laboratoire de recherche outillé; mais un facteur isolé ou un petit artisan, ou même une petite industrie, ne peuvent certainement pas s'équiper de ce point de vue, d'autant plus que la plupart des recherches impliquent des délais longs eu égard à la complication de tous les problèmes en cause en facture instrumentale. Seule la formule d'un laboratoire corporatif est pensable. Je crois aussi qu'il faudrait sensibiliser les fabricants d'instruments, en leur montrant l'intérêt de la recherche en ce domaine; malheureusement, d'une façon très générale, ils n'y croient pas - et alors pourquoi voudriez-vous qu'un ministère y croie pour apporter de l'aide. M. DELUNE, ici présent, a fait un effort important au Ministère de l'Industrie et de la Recherche, et a pu obtenir quelques actions en faveur de la facture instrumentale. Mais il faudrait aussi prévoir un enseignement adéquat, pour donner aux étudiants luthiers quelques données accessibles, qui leur permettraient au moins de comprendre ce qui est en cause lorsqu'on parle de recherche acoustique en facture instrumentale. Je n'ai pas le sentiment qu'on ait fait des efforts bien considérables dans les écoles de formation des futurs facteurs, sauf à l'École d'apprentissage des accordeurs du piano, au MANS (M. SINIGAGLIA); si je suis bien informé il

DISCUSSION (suite)

n'existe pas trace d'enseignement des méthodes de recherche acoustiques et de leur signification à l'école de lutherie de Mirecourt. Je crois que c'est fort dommage, car dans l'état actuel des choses, un fabricant de guitares ou de violons ne peut en rien espérer battre les concurrents japonais ou chinois quant au prix de revient; le seul espoir est de faire une qualité très franchement supérieure, et de réussir une fabrication parfaitement homogène en qualité : toutes choses seulement possibles si on dispose d'une doctrine acoustique, de moyens de contrôle scientifiques pour tester les matériaux et le résultat sonore de leur assemblage. Le but de la présente réunion était de montrer qu'une doctrine existe ainsi que les moyens et appareillages de contrôle adéquats. Il est vrai que cela est récent, pour les appareillages; mais je prêche dans le désert depuis trente ans (au congrès international de lutherie de la Haye, le luthier ENEL, représentant la lutherie française, ne déclarait-il pas que " la science ne peut rien apporter à la lutherie et n'apportera jamais rien "....).

M. X. - Avez-vous fait des analyses sur des guitares en polyester ?

M. LEIPP - Non; pour la simple raison que je n'en avais pas sous la main. Il y a bien vingt ans j'avais eu l'idée de faire une guitare en plexiglass, afin de pouvoir observer par interférométrie, ce qui se passait lorsque l'instrument vibrait. Tout cela n'a pu être mené à bien. Mais il est certain que si l'on fait une table en matériau isotrope on étudiera un autre phénomène, plus simple, que si on prend du bois - dont, comme chacun sait, les modules élastiques varient selon la direction considérée.

De ce point de vue, il n'est pas inutile de préciser que si on fait une guitare en matériau isotrope (plexiglass, polyester etc...), ayant exactement la même forme et les mêmes dimensions qu'une guitare classique en bois, cette guitare en matériau synthétique ne fonctionnera - donc ne sonnera - pas comme l'instrument en bois. On pourrait sans doute fabriquer de bons instruments en matière plastique, mais il faudrait alors repenser complètement la forme et la structure de l'instrument, en tenant compte justement de l'isotropie du matériau.

M. Y. - L'idée que vous avez eue de mettre une âme dans une guitare expérimentale me semble intéressante.

M. LEIPP - Ce sont évidemment des réflexions à partir du violon, que je connais bien, qui m'ont conduit à chercher à différencier et régler les degrés de liberté sous le côté droit et le côté gauche du chevalet. Bref, j'ai cherché à dissymétriser le système excitateur corde-chevalet.

M. FRIEDERICH : En réalité, nos guitares classiques ne sont pas symétriques....

M. BESNAINOU : Avec des amis, nous avons fabriqué une " guitare à âme "; mais avec un chevalet collé, l'expérience s'est révélée peu intéressante. Si on accroche les cordes au bout de la caisse, la guitare ne comportant aucun barrage, l'instrument sonne assez bien.

M. LEIPP - Oui, mais vous avez alors une " guitare de Jazz " dont le fonctionnement et la sonorité est très particulière.

M. BESNAINOU - Nous avons aussi fait une guitare très légère, espérant qu'elle sonnerait bien avec des cordes peu tendues. L'essai n'était pas démonstratif; l'aigu sonne mal.

DISCUSSION (suite)

- M. LEIPP - Une expérience ratée est généralement au moins aussi intéressante qu'une expérience réussie; on sait ce qu'il ne faut pas faire : en lutherie, c'est aussi important que de savoir ce qu'il faut faire....
- M. FRIEDERICH - Mettre une âme dans une guitare est une vieille obsession! LAGOYA m'avait fait fabriquer un tel instrument; le résultat n'était pas très brillant...
Il semble bien, donc, que pour la guitare classique, l'âme est une incompatibilité !
- M. BESNAINOU - Nous avons aussi essayé de tendre un fil de nylon entre table et fond, pour les coupler; en mettant le fil au centre de symétrie, celà marche assez bien.
- M. LEIPP - Je suis très heureux qu'il y ait des expérimentateurs parmi nous... Finalement on vérifie que lorsque plusieurs générations de luthiers ont cumulé un acquis empirique sur les instruments de musique, il est difficile de jeter cet acquis par la fenêtre. Nous en reparlerons bientôt au GAM. Mais il est toujours possible de concevoir et fabriquer des instruments " nouveaux " du type " guitare "; seulement il ne faut pas se faire trop d'illusions : un instrument de musique présente une combinatoire extrêmement compliquée de paramètres et de conditions pratiques de jeu, sans oublier l'oreille humaine; la complication du problème est telle qu'on ne peut espérer de solution théorique pure : un instrument de musique est toujours un compromis... et lorsqu'un instrument comme le violon ou la guitare classique est arrivé à un point optimal (ce qui demande, l'expérience l'a montré, de longues années de patience et d'essais) il devient extrêmement difficile d'y ajouter ou d'en enlever ou de modifier quoi que ce soit. La guitare classique en est là - tout comme le violon. La lutherie, jusqu'à l'époque actuelle, est restée strictement empirique : ce qu'il y a de nouveau, c'est qu'on dispose désormais de moyens scientifiques permettant de tester les matériaux et de porter un jugement appuyé sur des documents objectifs; bref, il est possible de faire de nombreux contrôles en cours de fabrication si on dispose de l'appareillage et des méthodes que j'ai préconisés ici. A ma connaissance, la fabrique des cordes SAVAREZ, est la seule à avoir fait à ce jour un effort considérable; moyennant quoi elle est susceptible de faire des cordes de qualité et d'obtenir une constance dans la qualité, même si des éléments viennent à changer dans la fabrication. Ceci pour les cordes. En facture instrumentale tout reste à faire, mais les idées, les appareillages et les méthodes existent, et j'en profite pour remercier les deux personnes qui ont fait le nécessaire pour celà : M. Charles MAILLOT et M. le Professeur SIESTRUNCK qui y ont cru voici plus de vingt ans.

LEIPP

Paris 23 Octobre 1977