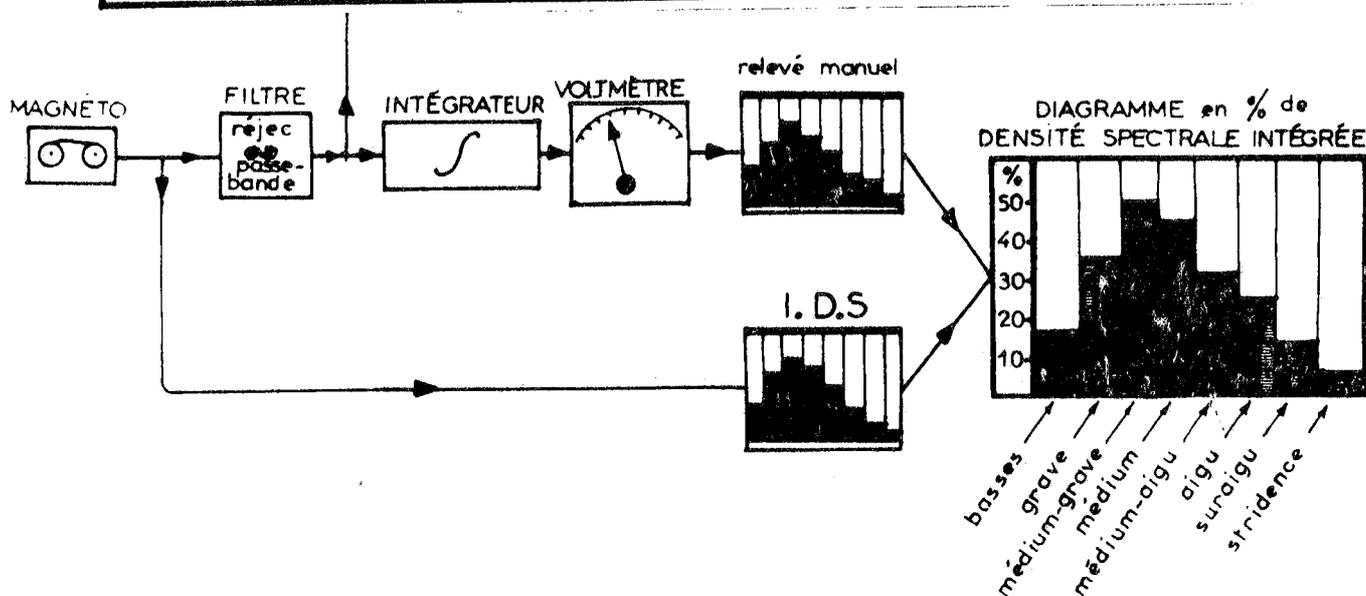


E. LEIPP

L'INTÉGRATEUR
de
DENSITÉ SPECTRALE
I D S
et ses applications



n° 94

déc. 1977

GAM

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

GROUPE D'ACOUSTIQUE MUSICALE
 Laboratoire d'Acoustique
 4, Place Jussieu, Tour 66
 5° Etage
 75230 - PARIS CEDEX 05

94ème REUNION DU G.A.M.

Thème : L'INTEGRATEUR DE DENSITE SPECTRALE IDS
 ET SES APPLICATIONS

par E. LEIPP

Excusés : M. le Professeur GAUTHIER : raison de santé; M. le Professeur SIESTRUNCK : obligations professionnelles.

Etaient présents :

M. LEIPP, Secrétaire général
 Melle CASTELLENGO, Secrétaire

Puis, par ordre d'arrivée :

M. KERGMARD (CNRS); M. GENET VARCIN (campanologue); M. DUPARCQ (Musicien); M. GEAY (Univ. AIX); Mme GENET-VARCIN (Anthropologue); M. VAN STRAELEN (Journaliste); M. AKIRA TAMBA (musicien; CNRS); M. GUILLOU (CNRS); Melle GUILLOU (Etudiante); M. GUETTAT (Musicologue); M. BORDAS (Ingénieur THOMSON); M. MOIROUD (Ingénieur du son; Dr PERROT (musicologue); M. PERROT Marc (doctorat); M. DERUTTER (Etudiant musicologie); M. DUBEAU (Etudiant); Mme BOREL MAISONNY (orthophoniste); M. LEGUY (instruments anciens); Dr KADRI (Médecin orthophoniste); M. ROUGIE (Etudiant); John WRIGHT (musicien); M. BATAISSIER (Secrét. Gén. SIERE); M. S. BARUCH (Ingénieur conseil); Melle LEVY-MANGEOL (orthophoniste); Melle Sylvie HUE (prof. musique); M. CORDEAU (Prof.); M. MAHE (prép. PCM); M. PERRI (préparateur); M. UNGEMACH (Etudiant); Mme Claude CAMY-VAL (Maître assistant); Mme OTTIE (Chef de travaux CNAM); M. BARDEZ J. (Prof. Musique); M. TESTEMALE (informaticien); M. FONTAINE (CNAM); M. CAUSSE (IRCAM); M. Max MILLANT (Luthier); Dr POUBLAN (Médecin biologiste); M. BDL; M. Robert CARRE (Prof.); Dr CHOAIN (Fac. Médecine LILLE); M. SIMANE (ingénieur; Babolat Maillot Witt); M. FORTIN (Secrétaire technique); Melle LEROY (EPHE); M. SURUGUE (PRSTOM); M. OSES (ORSTOM); Mme NIEKY (BPI - Centre Pompidou); M. CARFANTAN (Ingénieur); Melle BAZANTE (EPHE); M. LEGROS (Ingénieur); Mme A. FULIN (Professeur); M. MORKERKEN (Etudiant); M. VIVIE (Studio prise de son); M. NIEKY, Melle NIEKY (Elèves); M. J.J. BERNARD (Directeur de l'UER de Mécanique, Paris VI), M. BRIGUET (Ingénieur du son); M. Alain MAS et Madame. M. COMBASTET (Ingénieur); M. FRIEDERICH (Guitarier d'art); M. BOURGOIN; Dr CLAVIE.

Excusés : M. Charles MAILLOT (BMW Lyon), Luc ETIENNE; M. CONDAMINES; M. TRAN VAN KHE; Mme Edith WEBER; M. BAERD; Mme de VERTEUIL; M. BASCHET; M. CEZEN; M. LEBOEUF; M. FRANCOIS; M. PASQUET; M. CHENAUD.

PERIODIQUE : 6 numéros annuels.

Imprimeur : Laboratoire de Mécanique Physique de l'Université Paris VI.

Directeur de la publication : M. le Professeur R. SIESTRUNCK

Diffusion du bulletin du GAM : s'adresser à
 LE DROIT CHEMIN DE MUSIQUE
 5, rue Fondary
 75015 - PARIS - Tél : 575-12-14

L'INTEGRATEUR DE DENSITE SPECTRALE IDS

et ses applications en acoustique

par E. LEIPP

I. GENERALITES

Les problèmes de la " sonorité " des instruments de musique ont été mon principal souci pendant de très longues années. A l'époque, je m'intéressais au jeu du violon, à la fabrication de l'instrument et de ses cordes, aux concours de sonorité de violons; je faisais aussi de la recherche acoustique à titre privé pour un groupe de fabricants d'instruments de musique (AFIMA : Association de Fabricants d'instruments de musique et d'accessoires) : il s'agissait de pianos, de clarinettes, de saxophones, d'anches d'instruments, d'accordéon etc... Je faisais alors des tentatives pour comprendre ce que signifiaient les mots " qualité sonore ", " sonorité ". Mes essais subjectifs personnels, les avis des usagers des instruments, la versatilité apparente des musiciens, la lecture des compte-rendus de concours de sonorité de violons organisés à Paris entre les deux dernières guerres (bib.1), tout me laissait perplexe, désarmé, désorienté : la notion de " sonorité " semblait insaisissable, et tout semblait paradoxal. En 1952, je publiais une plaquette résumant mes conclusions, intitulée : " La sonorité du violon; étude des facteurs conditionnant la sonorité des instruments du quatuor ".

Le dernier chapitre traitait précisément des Concours de sonorité, et le dernier paragraphe portait comme sous-titre : " Machine à analyser la sonorité " : il est amusant d'en extraire quelques lignes,

" Les possibilités actuelles de la science permettent d'imaginer une machine destinée à remplacer le jury (des concours de sonorité). Ce serait fort commode, mais la réalisation matérielle serait certainement très délicate et complexe. Il faudrait enregistrer le résultat sonore sous forme de courbes et de chiffres; mais la difficulté résiderait surtout dans l'interprétation des résultats graphiques. De longues et délicates études préalables seraient nécessaires et on peut se demander qui s'intéresserait assez à cette question pour engager les capitaux nécessaires dans une affaire dont le rendement commercial serait pour le moins douteux. La machine est certainement réalisable, mais elle mécontenterait tout le monde, car elle serait surtout une machine à détruire les illusions " (je pensais surtout à l'"affaire Stradivarius!...").

Il y a de cela un quart de siècle; et c'était l'époque où j'ai eu la chance de rencontrer un chercheur du Centre de Recherche Industrielle et Maritime de Marseille, André Abraham MOLES, qui me proposa d'additionner nos connaissances pour tenter de concevoir et de réaliser cette " machine à détruire les illusions ".

Notre premier souci fut de chercher à mettre au point la " fiche caractéristique d'un instrument de musique ", et j'ai publié mes résultats en 1959 et 1962, en particulier (bib.3). L'idée de départ était d'utiliser, pour définir la qualité d'un instrument, les moyens électro-acoustiques de l'époque, ceux qui permettaient de tester la qualité d'un haut-parleur en relevant sa courbe de réponse, son " traînage " etc...

Mais dès le début, nous avons buté à un obstacle de taille! Les tests de haut-parleurs ou de baffles se faisaient en excitant la membrane par des procédés électromécaniques ou électro-magnétiques, à l'aide de sons sinusoïdaux de fréquence variable,

que l'on savait alors produire bien stables, bien reproductibles; car sans reproductibilité rigoureuse, impossible de formuler des lois, d'étudier la physique d'une source sonore. Or, le violon est excité par un spectre complexe, celui de la corde isolée; et dans le jeu normal de l'instrument, le musicien est incapable de refaire strictement la même chose deux fois de suite. Il faut donc absolument éliminer le musicien - sinon toute reproductibilité est totalement exclue. Ainsi fut fait, et je réalisai un " archet automatique " piloté par un petit moteur, où la vitesse de défilement de la mèche, la force et l'angle d'appui sur la corde, étaient réglables et parfaitement reproductibles. On devait donc pouvoir étudier le violon dès lors comme on étudiait un haut-parleur....

On aurait bien entendu pu exciter le violon, comme certains chercheurs l'avaient d'ailleurs fait, à l'aide de systèmes électro-acoustiques en utilisant des sons sinusoïdaux. Les résultats obtenus ainsi s'avèrent, hélas, peu réalistes et ininterprétables : on ne réussissait guère à définir la qualité d'un violon de cette manière, et c'est pourquoi nous avons abandonné cette idée au profit de l'archet automatique. Mais après une décennie de recherches, notre " fiche caractéristique " n'était guère plus convaincante !

Cependant un élément nouveau était apparu entre temps. C'est le SONAGRAPHE qui venait d'apparaître en France. Je pensais enfin tenir là " machine à détruire les illusions " que j'attendais depuis si longtemps. J'ai dès lors utilisé systématiquement le sonographe qui fut pour moi l'outil de base pour préparer ma thèse (bib. 3d). Lorsque M. le Professeur SIESTRUNCK me proposa de créer le Laboratoire d'Acoustique dans le cadre de son Département de Mécanique de la Faculté des Sciences de Paris, mon premier souci fut d'acquiescer un sonographe. Et depuis cette époque (1962), cet appareil est resté l'outil de base pour étudier les messages acoustiques. Le véritable intérêt du sonogramme réside dans le fait qu'il fournit des diagrammes fréquence-temps-intensité qui sont raccordable avec la sensation produite par un son complexe, évolutif, réalisé dans les conditions normales d'emploi d'une source. En fait, il nous renseigne sur la forme des sons dans leur contexte immédiat (quelques secondes). Mais au fur et à mesure de l'avancement de mes recherches il s'avérait que cet aspect d'ordre proche des messages sonores n'expliquait pas tout dans le domaine de la perception de messages sonores. Je me suis longuement expliqué sur ces questions ailleurs (bib.4). Les observations et expériences faites entretemps ont confirmé qu'il fallait en fait considérer aussi l'aspect d'ordre lointain des événements acoustiques. Que faut-il entendre par là ? Précisons-le par des exemples.

Quand nous écoutons une longue séquence de musique, quand nous comparons deux violons jouant la même pièce dans les mêmes conditions, quand nous diffusons successivement le même disque sur deux chaînes d'écoute, l'expérience montre qu'à la fin de l'écoute nous sommes capable de formuler un jugement sur la qualité sonore globale, éventuellement comparative, entre deux événements acoustiques. C'est un problème bien connu des musiciens, (lorsqu'ils parlent de la qualité de leurs instruments), des spécialistes de la haute-fidélité, des acousticiens des salles etc... Ce jugement global basé sur une écoute de longue durée échappe au sonographe, alors qu'il est extrêmement important dans un grand nombre de problèmes où l'information esthétique d'événements acoustiques est en cause. Pour saisir cette information esthétique, cette " coloration " statistique particulière d'un message acoustique, notre système auditif exploite nécessairement les mémoires à long terme et réalise certainement des opérations mentales particulières, relevant de mécanismes intégratifs, qui ont lieu dans notre cerveau. Pour tenter de connaître ces mécanismes, j'ai commencé par consulter les écrits des spécialistes de la psycho-acoustique. En fait je n'ai trouvé aucune réponse satisfaisante. Je me suis alors souvenu des conseils de MOLES : le plus prégnant, lorsqu'on est dans l'impossibilité de comprendre des mécanismes inobservables (par exemple ceux de la perception d'ordre lointain), consiste à chercher à simuler les mécanismes en question sans se soucier de la réalité anatomo-physiologique auditive. L'important est alors de concevoir un organigramme pour définir les fonctions nécessaires, et de fabriquer un " modèle ", une machine, qui " réagisse comme " l'organisme à étudier. Dès lors on peut espérer comprendre les mécanismes inobservables en direct, par exemple ceux qui sont à la

base des sensations subjectives de " coloration " constamment évoquées par les musiciens et autres praticiens du son : preneurs de son, spécialistes HIFI etc... Voici une dizaine d'années, j'ai commencé à réfléchir à cette question, et amorcé des recherches préliminaires : il s'agissait de concevoir des méthodes et de réaliser des appareillages simulant l'écoute d'ordre lointain, et susceptibles de fournir des documents statistiques sur des événements sonores de longue durée, éventuellement raccordable avec les sensations subjectives d'ordre lointain.

Le premier prétexte d'utilisation de la méthode que j'élaborai alors fut de nature musicologique. Voici les faits.

Avec TRAN VAN KHE, nous avons fait de nombreuses recherches sur les musiques ethniques, et mis au point une méthode utilisant le sonographe, permettant de relever la ligne mélodique d'un chant ou d'une pièce instrumentale. On obtenait ainsi un diagramme portant la fréquence en ordonnée et le temps en abscisse, sur lequel une ligne évolutive indiquait les changements de hauteur dans le temps : bref, une " partition authentique ", où toutes les inflexions de hauteur de la voix ou d'un instrument étaient indiquées avec précision. Les musiciens ethniques se servent généralement de leur voix ou d'instruments à sons continuellement variables (genre violon); ils ne chantent et ne jouent pas du tout des notes fixes, mais produisent des sons de hauteur évolutive, plus ou moins soudés les uns aux autres par des " glissandos ", et autres " ornements ". En fait, et on le vérifie à la simple observation visuelle, telle chanteuse ou tel joueur de rebab ou de saranghi cerne quand même statistiquement quelques régions fréquentielles préférentielles, que l'on peut assimiler à des " échelons de gammes ". Mais les " notes " de ces gammes n'ont qu'une signification statistique : le musicien, en fait, ne joue jamais exactement la même hauteur pour une même " note ". J'ai alors eu l'idée fort simple de recopier la ligne mélodique (d'une berceuse vietnamienne, dans l'exemple de la figure 1 a) sur du papier quadrillé, millimétré. Ensuite, j'ai tout simplement additionné, sur chaque ligne millimétrée horizontale, les points d'intersection avec la ligne mélodique. En reportant le total des points de chaque ligne sur un diagramme séparé (petit diagramme en bas, à droite de la figure 1 a), on obtenait une courbe de " taux d'occurrence " de chaque fréquence, d'où émergèrent des " bosses " à allure gaussienne, dont les sommets représentent en fait les " notes " de la gamme que cerne le musicien (voir figure 1a). On peut bien entendu faire toutes les opérations (fastidieuses...) avec l'aide d'un ordinateur, ce que nous avons effectivement fait (fig. 1 b - Bib. 7a). Mais au lieu de ne considérer que le fondamental d'un sonogramme de chant ou de musique, il suffit de prendre un sonogramme complet, comportant les sons et tous leurs harmoniques ou partiels. On obtient alors, en procédant comme précédemment, la courbe de densité spectrale d'une séquence de musique indiquant la répartition statistique de l'énergie dans cette séquence.

L'idée de base était trouvée : il suffisait de la développer, de concevoir et de réaliser les moyens matériels pratiques pour faire ces relevés de densité spectrale. C'est à quoi nous nous sommes employés avec M. SOLE et M. SAPALY dans le cadre de l'E.R.A. 537 du C.N.R.S.

Voici comment se sont développées mes recherches personnelles sur ce point.

II. RECHERCHE D'UNE METHODE ET D'UN APPAREILLAGE POUR SIMULER

LA SENSATION AUDITIVE D'ORDRE LOINTAIN.

1°) CONSIDERATIONS GENERALES : LUMIERE ET SONS

Le problème de l'association des sons et des couleurs n'est pas nouveau, et nous avons abordé cette affaire récemment, lors du GAM sur " l'audition colorée " (COM-BASTET, Juin 1975). Le " clavecin à couleurs " fut inventé voici deux siècles, et

nous avons eu souvent l'occasion de parler de tout cela avec des musiciens. M. André RETIOT nous avait communiqué ses réflexions, voici 15 ans, ^{contenus dans} un petit opuscule qu'il avait écrit sur le thème : " SONS et COULEURS : Trichromie harmonique des fonctions tonales ". De son côté, MESSIAEN était passé à notre laboratoire et tout le monde sait qu'il s'intéresse à ces questions. Mais il convient de préciser ici que la préoccupation des musiciens reste difficile à cerner clairement. La raison en est simple... Il est bien aisé de préciser par des mots les sensations qu'on éprouve, surtout lorsqu'il s'agit " de goûts et de couleurs..." Les vocables utilisés en un domaine sensoriel ^{sonor} déduits d'analogies avec d'autres sens : ce violon est "clair"; ce basson est "sombre" etc... En fait, le problème reste entier, et on continue à se poser des questions si on veut savoir ce que recouvrent exactement des vocables comme " échos des tonalités " chers aux musiciens, "coloration" d'un instrument, d'un baffle etc...

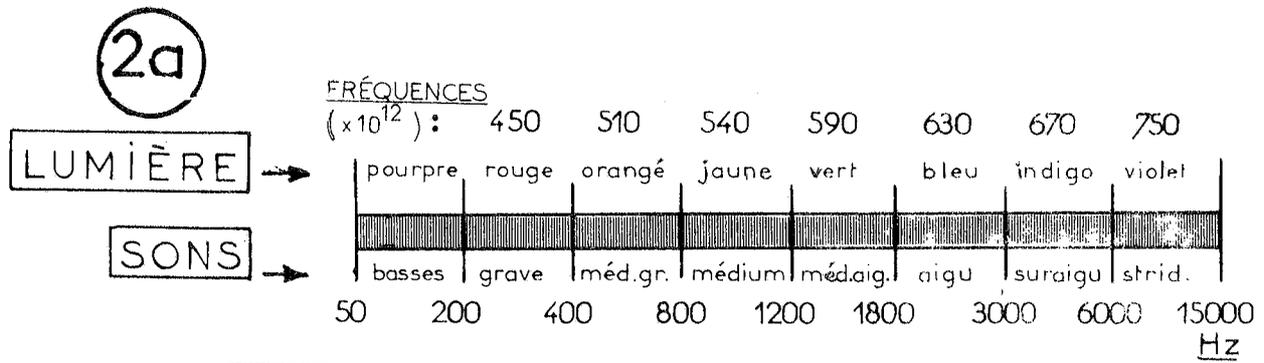
Bref, tout cela reste bien " subjectif " et insaisissable ! La seule méthode d'objectivation rationnelle de la couleur des sons reste celle de COMBASTET, qui a conçu et construit un appareillage comportant une série de filtres et un écran de téléviseur couleur. Lors de l'écoute d'une musique donnée, chaque son est transformé en une couleur unique résultant de la combinatoire des couleurs élémentaires attribuées à chacune des bandes spectrales élémentaires. L'écran " couleur " est intéressant à observer; mais après une écoute de quelques minutes, ou même de quelques secondes, il est impossible de se rappeler la suite des " papillonnements " colorés que l'on a vécus, d'en faire une synthèse. Pour l'écoute d'ordre proche, instantané, de sons relativement stables, le système est parfait; mais un son normal de message sonore est, par définition, un être évolutif (sinon il ne peut véhiculer d'information), et dès lors, pour l'écoute d'ordre lointain, la méthode n'est pas utilisable. Visiblement ce qui manquait à l'appareil de visualisation colorée de la musique de COMBASTET, c'était la fonction d'intégration à long terme...

Il fallait donc repenser la question autrement, et voilà comment je m'y suis pris.

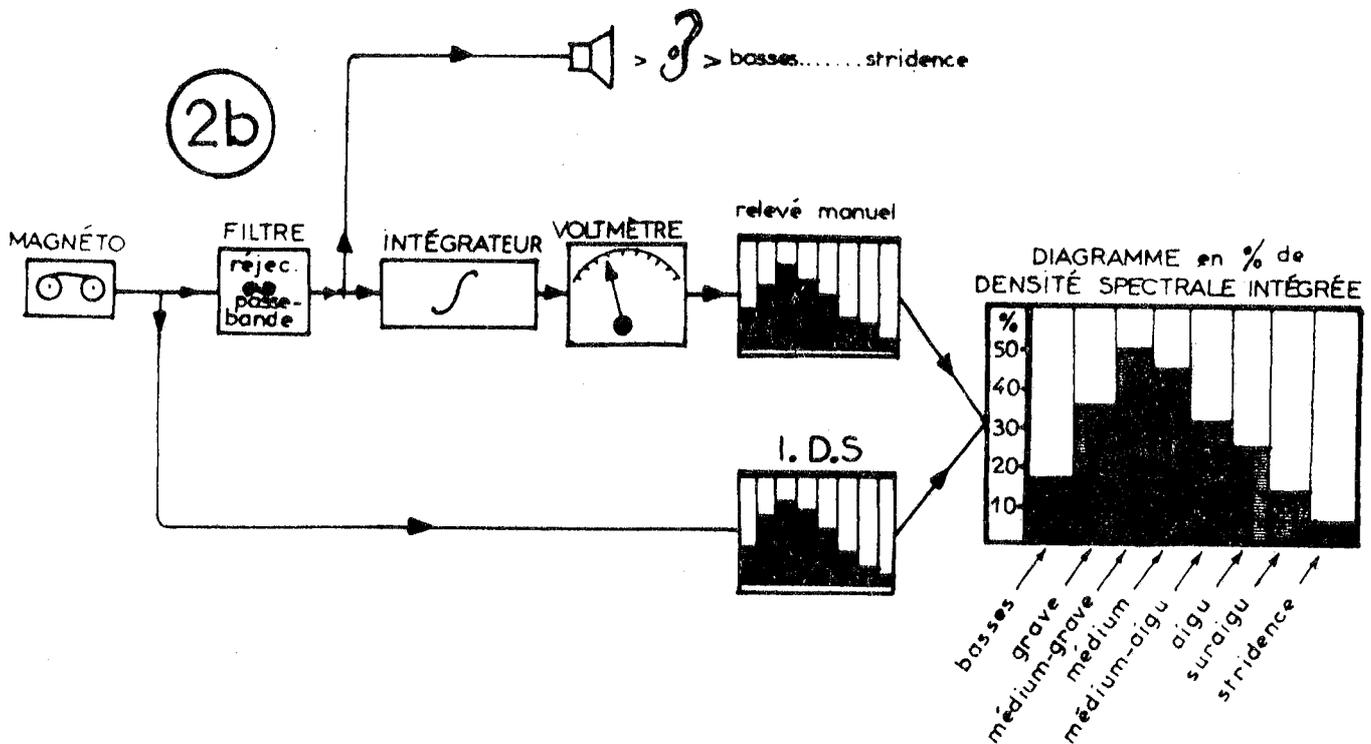
L'idée de départ était de chercher d'abord s'il existait un parallèle entre la vision colorée et l'audition colorée d'ordre lointain. Pour cela rappelons la vieille expérience de NEWTON. Tout le monde connaît l'expérience du disque à segments colorés juxtaposés, qui montre que la couleur blanche est la somme d'un certain nombre de couleurs élémentaires. On vérifie aisément par ce procédé que si l'on enlève une des couleurs élémentaires, la lumière blanche devient alors une lumière colorée. Les idées de NEWTON sont intéressantes mais un peu simplistes. D'autres chercheurs ont montré que les choses étaient en fait beaucoup plus compliquées dès que l'on passait à la réalité visuelle, lorsqu'il s'agit par exemple de peinture d'art (LAPICQUE bib.5 - qui a le mérite d'être à la fois physicien de la couleur et artiste peintre...).

De toutes façons il est bien évident que le découpage de la lumière en 8 bandes de couleur élémentaire est arbitraire (fig.2a). On sait que dans le domaine des longueurs d'onde (ou des fréquences, que nous adoptons ici) on distingue généralement huit couleurs de base : le pourpre, le rouge, l'orangé, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo et le violet. Les fréquences centrales de chaque bande ^{colorée} sont indiquées sur la figure : ces fréquences couvrent moins d'une octave!

Tentons à présent un parallèle entre ces bandes colorées et d'éventuelles "bandes sensibles" sonores ! Par avance, nous savons ^{donc} que, dans le domaine de la lumière, le nombre de bandes ainsi que leurs "fréquences limites" sont parfaitement arbitraires. Cependant l'expérience montre que ces notions sont assez généralement admises par les usagers et les praticiens de la couleur. S'agit-il uniquement d'un problème de conditionnement c'est-à-dire d'apprentissage des couleurs élémentaires dès l'enfance ? Ou est-ce parce que la nature fournit aux peintres des matières colorantes utilisables correspondant aux 8 couleurs primaires ? Je ne saurais le dire ! Mais il est probable aussi que le système visuel humain n'est ^{en fait} capable de saisir et de traiter qu'une



Le parallèle sons-lumière a souvent été tenté: les "bandes sensibles" colorées correspondent assez bien avec les "bandes sensibles" auditives choisies ici.



ORGANIGRAMME des RECHERCHES sur la DENSITÉ SPECTRALE:

- 1°) En haut: on fait écouter de la musique enregistrée en coupant successivement des bandes à l'aide d'un filtre de réjection (choix des bandes sensibles)
- 2°) Au milieu: On règle le filtre en "passe bande" et on relève successivement dans chaque bande la quantité d'énergie qui y est contenue. Il faut repasser 8 fois la même bande magnétique: c'est long - alors...
- 3°) En bas: L'I.D.S. donne directement le diagramme en temps réel...

combinatoire de huit éléments au maximum! Si on découpait la gamme des couleurs visibles en 3 bandes seulement, ce serait certainement insuffisant pour expliquer toutes les sensations colorées que nous éprouvons. On peut bien peindre un tableau avec trois couleurs, mais il manquera quelque chose à la palette du peintre! D'autre part, si on donne au peintre 30 couleurs différentes, cela ajoutera-t-il quelque chose de perceptible à ce qu'il ferait avec huit couleurs? Personnellement je suis assez tenté de croire que ce découpage en 8 bandes est optimal pour la majorité des personnes, lorsqu'il s'agit de tableaux ou de photographies en couleurs (quoiqu'il existe toujours, dans les domaines sensibles, des sujets surdoués ou sous-doués.) Alors pourquoi ne pas poser l'hypothèse que toutes les informations que nous captions, ^{quelque nature} qu'elles soient, sont traitées par le même "ordinateur central", ce qui différencie nos sens n'étant que les types de capteurs (sensibles simplement à des longueurs d'ondes différentes). Alors pourquoi ne pas choisir aussi 8 bandes sensibles dans la gamme des sons perçus? Reste, ^{alors} à déterminer les fréquences-limites qu'il convient d'adopter pour étudier la "coloration" des messages sonores!

C'est pour répondre à ces questions, et pour justifier les fréquences-limites de la figure 1 que j'ai entrepris toute une série d'expérimentations que je vais à présent relater brièvement.

2°) EXPERIENCES POUR DETERMINER LE NOMBRE ET LES FREQUENCES LIMITES DES BANDES SENSIBLES

J'appelle donc "bandes sensibles" les bandes dont le nombre et la délimitation fréquentielle sont nécessaires et suffisants pour permettre de comprendre, à travers leur combinatoire, la sensation de coloration telle que les praticiens des messages sonores l'éprouvent et nous la décrivent. D'avance, nous savons qu'il est oiseux de rechercher en ce domaine toute précision rigoureuse; l'important est de définir (et de s'y tenir!) un système de découpage qui nous permettra de réaliser un appareillage fixe, dont les diagrammes confirmeront la très grande partie des avis subjectifs des praticiens du son.

Cette tentative de découpage en bandes significatives n'est pas nouvelle. Plusieurs auteurs (dont ZWICKER), partant de considérations neurologiques plus ou moins hypothétiques, ont déjà tenté de définir des "bandes critiques", en particulier dans certains domaines de l'acoustique (celui du bruit par exemple). Après de longues années d'existence, ces "bandes critiques" n'ont guère été adoptées... On ne peut s'en étonner outre mesure. En tous domaines, si on part de considérations hypothétiques, théoriques, on est à peu près sûr, d'aboutir à des abstractions, très satisfaisantes pour l'esprit, mais nécessairement, ^{tous} irréalistes dès qu'on veut passer à la réalité. C'est particulièrement vérifié dans les domaines où l'homme est en cause!

Ces considérations m'ont en tout cas conduit à adopter un impératif absolu dans toutes mes recherches: celui d'écartier tout ce qui n'est pas exclusivement expérimental. Je pense qu'il faut rejeter ici tout ce qui n'est pas la réalité des messages sonores tels qu'ils sont diffusés et captés dans les conditions normales d'emploi. Je rejette pour cela les artefacts sonores: pour mon expérimentation je ne veux employer que de la musique ou de la parole réelle, normale. De plus, je ne veux solliciter que des sujets dont j'ai au préalable testé l'oreille (audiogramme normal, fréquence de coupure aiguë et pouvoir séparateur temporel), et qui sont longuement entraînés à l'écoute des événements sonores (musiciens en particulier). Ces "sujets" je les trouve parmi les étudiants de mon cours d'acoustique, parmi des musiciens ou des mélomanes qui fréquentent mon laboratoire etc... Ces conditions étant bien définies au départ, voici comment j'ai débuté mes investigations.

Je choisissais une oeuvre complète, ou longue séquence de musique normale, soigneusement sélectionnée. Par exemple je prenais une oeuvre d'orchestre classique bien fourni, où tous les timbres et tous les types de sons existent statistiquement lors de l'exécution de l'oeuvre. Certains compositeurs, en particulier ceux de l'époque

romantique et du début de ce siècle, ont composé des oeuvres de ce genre en grand nombre. Lorsqu'on analyse leurs partitions, et lorsqu'on écoute attentivement leurs oeuvres, on ne peut manquer d'observer qu'ils exploitent en fait toutes les possibilités du système auditif humain pour lui convoyer dans le temps minimal le maximum d'information possible. A la fin du "SACRE", toutes les capacités de notre système auditif ont été mises à contribution, toutes les régions fréquentielles ont été exploitées! D'autres compositeurs étaient extraordinairement doués de ce point de vue : il suffit d'être musicien et d'étudier leurs partitions orchestrales. Prenons Richard STRAUSS, parmi d'autres ! Pour la démonstration, enregistrons sur bande la " GRANDE VALSE " du Chevalier à la Rose !

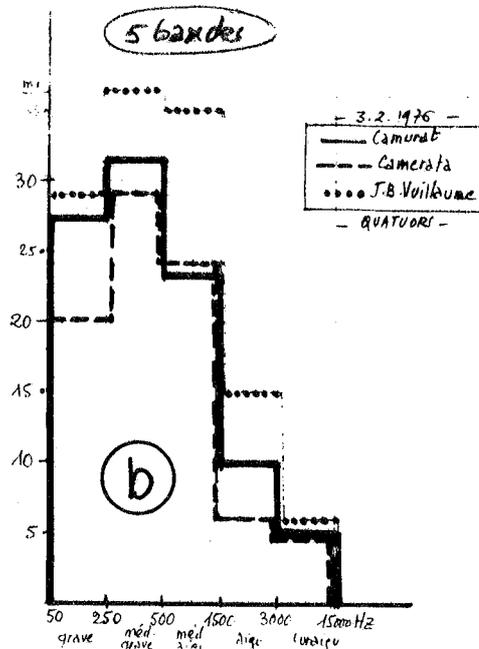
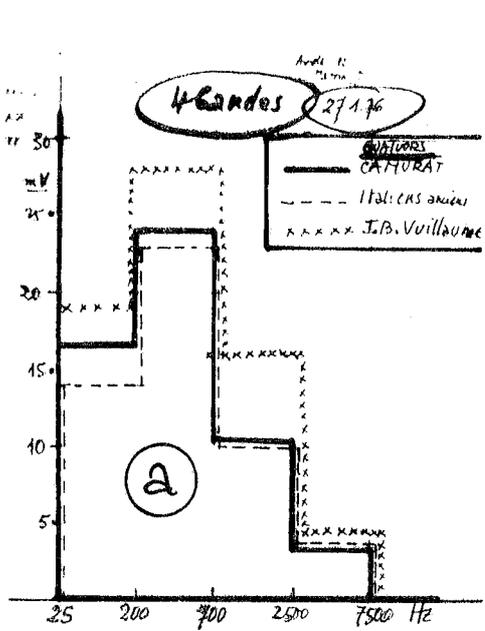
Écoutons d'abord normalement cette pièce sur une bonne chaîne de haute fidélité. Pour peu que nous soyons un auditeur attentif et entraîné, nous aurons une idée claire de la " coloration orchestrale " à la fin de l'écoute. Si nous écoutons ensuite une séquence de la MER de Debussy, nous ressentirons avec évidence que cette sensation de coloration globale est bien différente... Mais revenons à la " Grande Valse "... Nous voudrions à présent savoir quelle est la signification et l'importance de telle telle bande de fréquence dans la sensation globale de coloration que nous avons éprouvée. Pour cela, nous partirons de considérations naguère élaborées par certains psychologues de la forme : les gestaltistes. Ceux-ci nous ont appris d'abord qu'un "tout" n'était pas égal perceptivement à la somme de ses parties et que pour comprendre le rôle d'une partie, il ne fallait pas l'isoler d'un tout et l'étudier isolément. Il fallait supprimer cette partie dans le tout et étudier ce que ce "tout" devient perceptivement lorsqu'il est privé de la partie à étudier.

En fait, l'expérience est facile à réaliser avec un filtre de réjection. Réécoutons la " Grande Valse ", et réglons le filtre de réjection de manière à couper, de temps à autre lors de l'audition, une bande allant par exemple de 1000 à 1500 Hz. Si l'oreille perçoit nettement une différence de " coloration ", réduisons la bande entre 1000 et 1200 Hz. Si la coloration auditive ne change pas lorsqu'on rejette cette dernière bande, c'est que la " bande sensible " est plus large, dans cette région, que la bande de 1000-1200 Hz. Par tâtonnements successifs on réussit donc à déterminer expérimentalement les bandes sensibles du domaine sonore auditif. Les impressions personnelles doivent nécessairement être confirmées par des tests statistiques. C'est pourquoi j'ai fait toute une série d'expériences, mettant à contribution mes étudiants ou autres personnes qui s'y prêtaient. J'ai commencé par découper l'aire audible en trois grandes bandes : grave, médium et aigu. ^(voir figure hors-texte) Mais l'expérience a rapidement montré que ce découpage était trop grossier pour que les résultats de tests puissent être mis en parallèle avec les sensations colorées. J'ai ensuite fait des essais en "rejetant" successivement 5 bandes, puis 7, 8, 11, 13, 15 bandes. Petit à petit il s'avéra que trois bandes étaient insuffisantes; mais d'autre part 15 bandes étaient inutiles. Je me suis finalement arrêté à 8 bandes sensibles. Chose curieuse : ce nombre se raccorde avec le nombre de couleurs élémentaires visuelles!

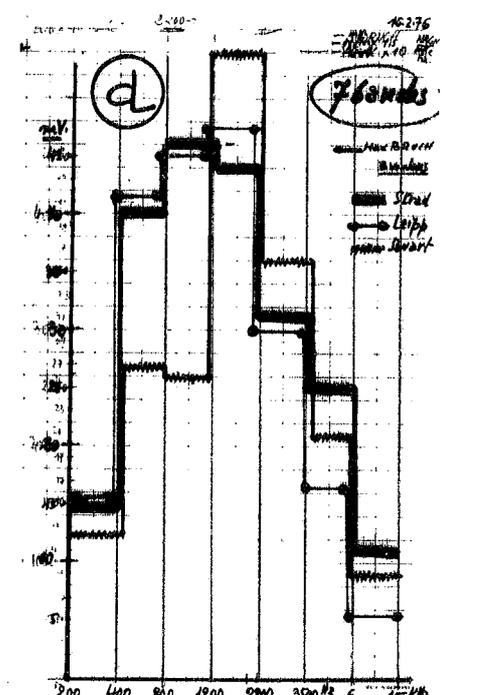
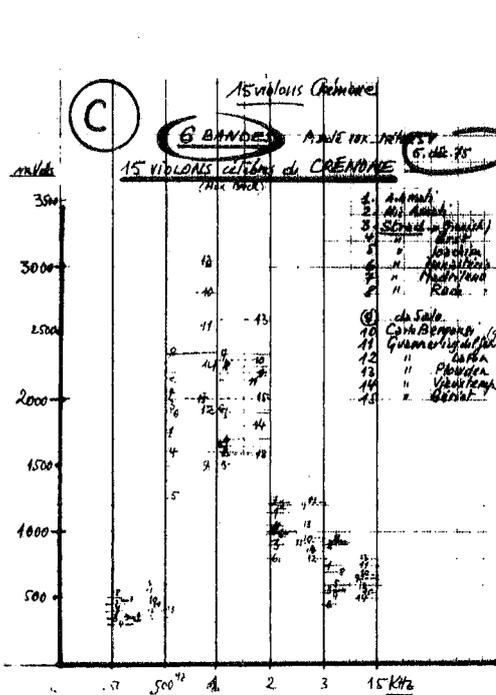
Ce point étant tranché, il fallait déterminer les limites fréquentielles de ces 8 bandes. Le procédé était simple. A un auditoire de 30 sujets par exemple, on fait écouter la Grande Valse (ou telle autre oeuvre bien choisie). On procède alors systématiquement de la façon suivante. On coupe de temps à autre, en cours d'audition, la bande la plus grave, en réglant le filtre de réjection entre 50 et 75 Hz par exemple. Si personne ne réagit, on élargit cette bande, par exemple de 50 à 100, à 150, à 200 Hz, jusqu'au moment où tous les sujets (à peu près) réagissent : " il n'y a plus de basses "! Si la fréquence de coupure aiguë était alors à 200 Hz par exemple, on appellera cette bande de 50 à 200 Hz la " bande des basses ".

Puis on recommence l'expérience en partant de 200 Hz, en réglant la réjection de 200 à 250 Hz. Si personne ne proteste, on élargit la coupure de 200 à 300 Hz etc.. Si, en arrivant à 400 Hz, tout le monde proteste : " il n'y a plus de graves ", c'est "creux" etc..., on appellera la bande de 200 à 400 Hz la bande sensible des "graves".

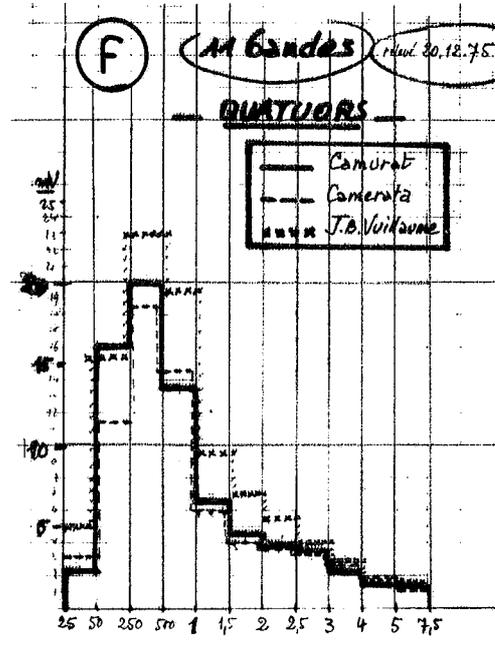
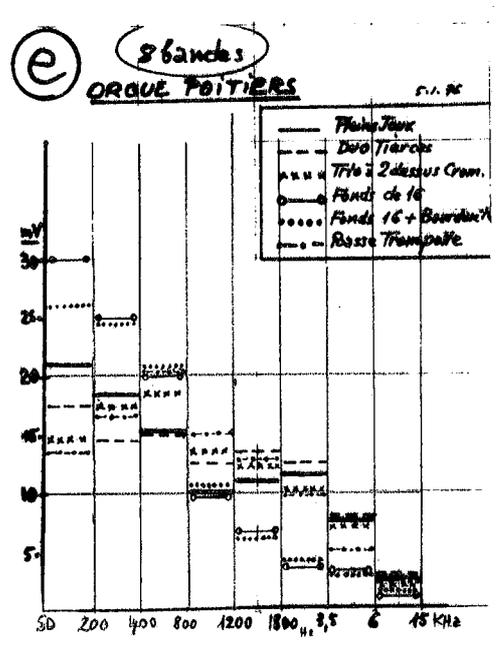
Fig. lors l'exé



Dès 1975 de nombreux essais furent faits pour définir le nombre de "bandes sensibles". L'expérience, faite avec des auditeurs entraînés à l'écoute musicale, montra que 4 bandes étaient insuffisantes et que 11 bandes (nous avons essayé jusqu'à 15 bandes) c'était trop !...



On vérifie qu'avec 8 bandes on atteint un optimum : en rajouter n'apporte rien, en ôter une montre l'insuffisance de 7 bandes ! Il semble donc bien que le système



capable de traiter une combinaison de 8 éléments et guère plus ! D'où l'intérêt de conserver 8 "bandes sensibles"

Et ainsi de suite. Finalement on aboutit à un découpage en 8 bandes de toute la gamme des fréquences perçues !

Fait étrange, ce découpage n'a visiblement aucun aspect rationnel. On passe successivement de 2 octaves (50 à 200 Hz) à une octave (200-400 Hz), puis encore une octave (400-800 Hz) puis une quinte??? (rapport 3/2) pour le médium. On retrouve encore une quinte pour le médium aigu; ensuite une sixte pour l'aigu; une octave pour le suraigu, et finalement une douzième pour la bande de stridence.

Cette anomalie de découpage fréquentiel n'est qu'apparente. En effet, comme nous partons de la réalité sonore d'un message conçu par l'homme pour le système auditif de l'homme, il ne peut y avoir aucune systématique dans les bandes sensibles pour la bonne raison que l'oreille, contrairement à ce que l'on pense et dit, n'est en réalité ni linéaire ni logarithmique lorsqu'il s'agit de messages informationnels. Par contre, tout le monde sait que l'oreille est beaucoup plus sensible dans la région de 1000 à 2000 Hz; non seulement en fréquence, mais aussi en pouvoir séparateur temporel. C'est bien pourquoi les praticiens des messages sonores destinés à l'homme ont de tout temps exploité cette zone fréquentielle où il est possible de communiquer à l'homme le maximum d'information dans le minimum de temps. Bref, les irrégularités " aberrantes " des bandes sensibles, déterminées expérimentalement, sont simplement le signe tangible de l'inégalité de capacité de saisie d'information par l'oreille dans les diverses régions fréquentielles. Nous n'insisterons pas! Ceux que ces questions intéressent trouveront d'autres détails dans l'une de nos publications récentes (bib.6), où il est montré que, finalement, tout cela se raccorde assez bien avec les recherches de certains psycho-physiologistes de l'audition (BÜRKE - LICHTÉ - KOTOWSKI, STEVENS et d'autres), et aussi avec le " faire " des facteurs d'instruments de musique traditionnels, des compositeurs et des exécutants, qui, depuis toujours, et empiriquement, exploitent de façon optimale le système auditif lors de leurs prestations.

La suite des opérations vint de soi. Le filtre électronique dont je disposais permet non seulement de rejeter telle ou telle bande dans un " tout " musical, mais aussi de laisser passer uniquement celle que l'on désire, lorsqu'il est réglé en " passe-bande ". Reprenons alors notre échantillon musical et réglons le filtre de façon à ne laisser passer que la première bande sensible (50 à 200 Hz). Allons auprès d'un électronicien, et demandons-lui de nous réaliser un intégrateur électronique permettant de cumuler l'énergie contenue dans la bande de 50 à 200 Hz pendant toute la durée de l'échantillon musical. Aussitôt dit, aussitôt fait : M. SOLE me fabriqua un tel intégrateur. Je n'avais plus qu'à relever la quantité d'énergie contenue dans chaque bande après avoir réglé chaque fois le filtre de façon adéquate (fig. 2b). Finalement on porte les valeurs relevées sur un diagramme où les bandes critiques sont en abscisse, et les quantités d'énergie en ordonnée.

Ces diagrammes sont hautement " parlants " et permettent des rapprochements tout à fait évidents avec la sensation de " coloration " dont il a été question plus haut. Pour un spécialiste HIFI, les mots : pas de basses, trop d'aigu, pas de médium, sonorité creuse, stridence etc... prennent un sens tout à fait précis à la lumière de l'allure des diagrammes. Nous tenons enfin la méthode tant désirée pour objectiver la " balance sonore ", la " sonorité globale ", la " coloration " chère aux praticiens du son.

Un petit ennui cependant! Si on se propose de comparer les diagrammes de "ux " sonorités ", de deux " colorations ", il faudrait normaliser la quantité d'énergie contenue dans les séquences musicales utilisées! C'est là un problème qui semblait insoluble. La réponse est pourtant facile! A la fin d'un relevé, il suffisait d'additionner les valeurs des 8 colonnes, puis de calculer la grandeur dans une colonne donnée en pourcentage de l'énergie totale. Ce que j'ai fait. Et dès lors, tous les diagrammes devinrent comparables entre eux, indépendamment de la durée de l'enregistrement et de son intensité.

J'ai relevé de cette façon de très nombreux diagrammes, dont l'intérêt commençait à devenir de plus en plus évident en de nombreux domaines sonores. Mais comme il fallait repasser 8 fois chaque échantillon sonore, cela s'avérait long et fastidieux. Par chance il existe au Laboratoire de Mécanique Théorique et Expérimentale de St-CYR (Professeur SIESTRUNCK) un Département d'électronique (Professeur SAPALY, électronicien M. COTIN), où, l'expérience l'a montré, je puis en confiance apporter un cahier de charges d'un appareillage nouveau, si compliqué soit-il... Tout le monde se rappelle de notre synthétiseur de parole (l'ICOPHONE) et de notre orgue expérimental (le CANTOR) - et d'autres choses encore! Bref, la question fut posée de construire un appareillage opérationnel qui permettrait d'obtenir les diagrammes désirés en une seule lecture du document sonore, en direct et en temps réel. Cet appareil existe désormais : c'est l'Intégrateur de Densité Spectrale (IDS)

3°) L'INTEGRATEUR DE DENSITE SPECTRALE IDS

Après tout ce qui précède, nous pourrions être bref quant à la description de l'IDS. Voici le " tableau de bord " de l'appareil (fig. 3a).

La séquence sonore peut être " entrée " à loisir par microphone ou magnétophone. On dispose d'un réglage du gain d'entrée avec contrôle de la saturation par diodes lumineuses (en haut, à gauche). On peut régler l'appareil pour diverses sensibilités et relever ainsi des événements sonores allant de quelques secondes à une heure si on le désire. On commence par " effacer " éventuellement le schéma inscrit auparavant en agissant sur le bouton " RAZ " (remise à zéro). Puis, après réglage adéquat du gain et de la sensibilité, on " entre " la séquence sonore à étudier. Au fur et à mesure du déroulement de l'évènement sonore, on voit l'aiguille monter dans chaque bande; plus ou moins vite, selon la quantité d'énergie relative en présence dans chaque bande. A la fin de la séquence (ou lorsque l'une des aiguilles arrive au voisinage de la limite supérieure dans une bande quelconque), on agit sur le bouton affichant le pourcentage. Le problème est résolu : on a immédiatement, en pourcentage, le diagramme de densité spectrale intégrée. On relève alors sur papier à cadre prétracé le diagramme affiché. Ce papier étant du papier calque, on peut aisément, par simple superposition, comparer des diagrammes de toutes sortes; la comparaison est significative puisque tout est ramené à des pourcentages!

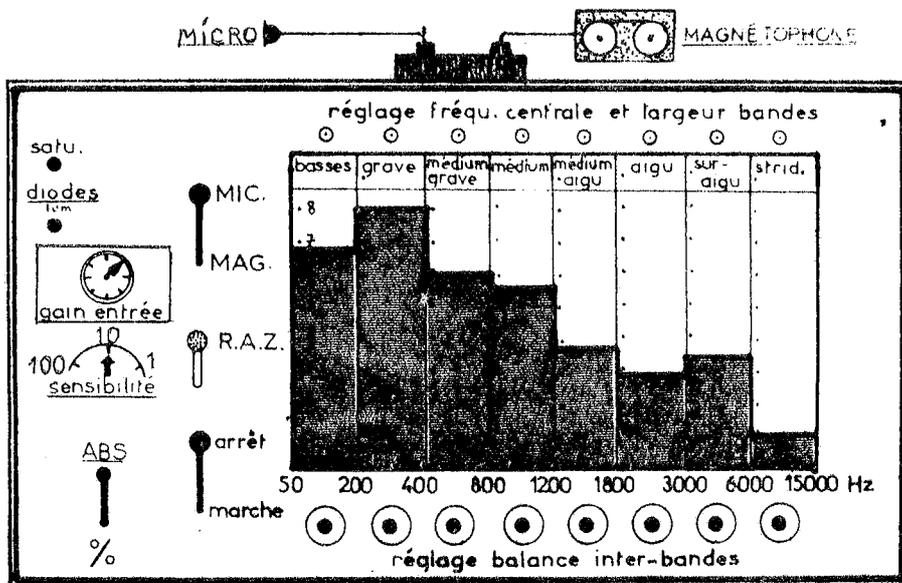
Il va sans dire que ces diagrammes sont intéressants à observer de deux façons différentes :

- On peut considérer leur allure globale, comparative éventuellement. Cette allure décrit la " balance sonore "....
- Mais on peut aussi chercher à comparer ce qu'on a perdu ou gagné dans l'une des bandes sensibles, en passant par exemple d'un instrument de musique ou d'un baffle à l'autre. Il faut évidemment calculer alors les pourcentages d'écart dans chaque bande. Un écart global donné (de 2 % par exemple, dans le cas de la figure 3b) peut être plus ou moins important selon le " contenu " de la bande considérée. Ainsi un écart global de 2 % correspond à 10 % dans la bande de 50 à 200 Hz, à 40 % dans la bande de 1200 à 1800 Hz etc... Lors de comparaisons, le pourcentage à l'intérieur d'une bande est déterminant.

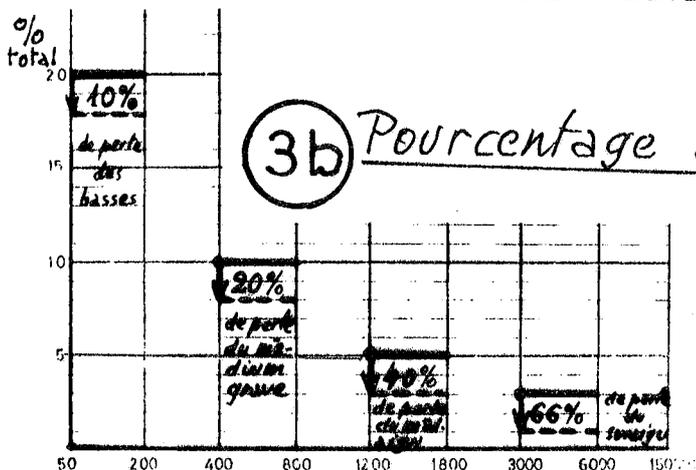
Quoiqu'il en soit, les diagrammes comparatifs superposés sont éloquents. La figure 3c en montre un exemple sur lequel nous reviendrons plus loin (comparaison de trois violons).

A noter qu'il a été réalisé, pour cet appareil, une sortie numérique. On obtient alors directement une suite de nombre imprimés, donnant pour chaque colonne, le pourcentage considéré. Dans certains cas (archives d'un rééducateur de parole par exemple), ce relevé numérique automatique est intéressant. Dans d'autres cas l'apparition graduelle

3a

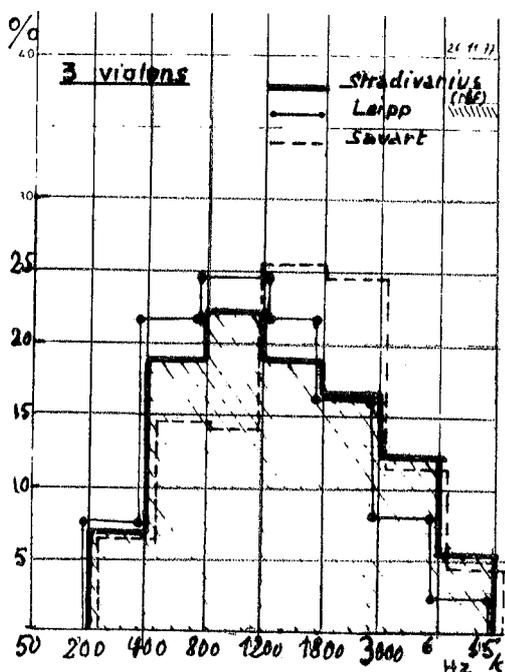


"Tableau de bord" de l'IDS. On peut régler toutes les variables en présence



3b Pourcentage d'énergie:

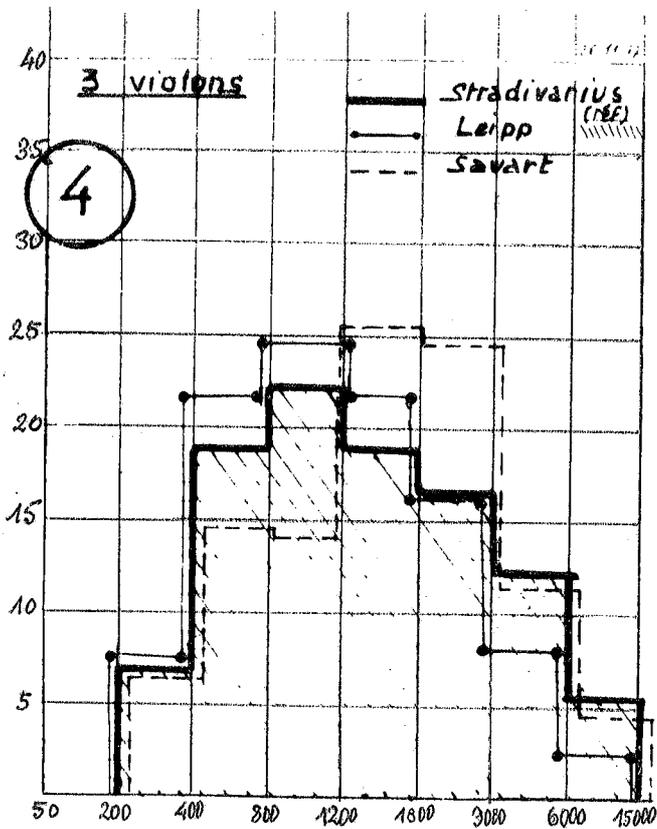
Chaque interligne correspond à 1% de l'énergie totale. Mais on peut calculer le % à l'intérieur de chaque bande isolée. Ici on compare deux phénomènes dans chaque bande: 2% du tout correspondent à 10, 20, 40% etc respectivement



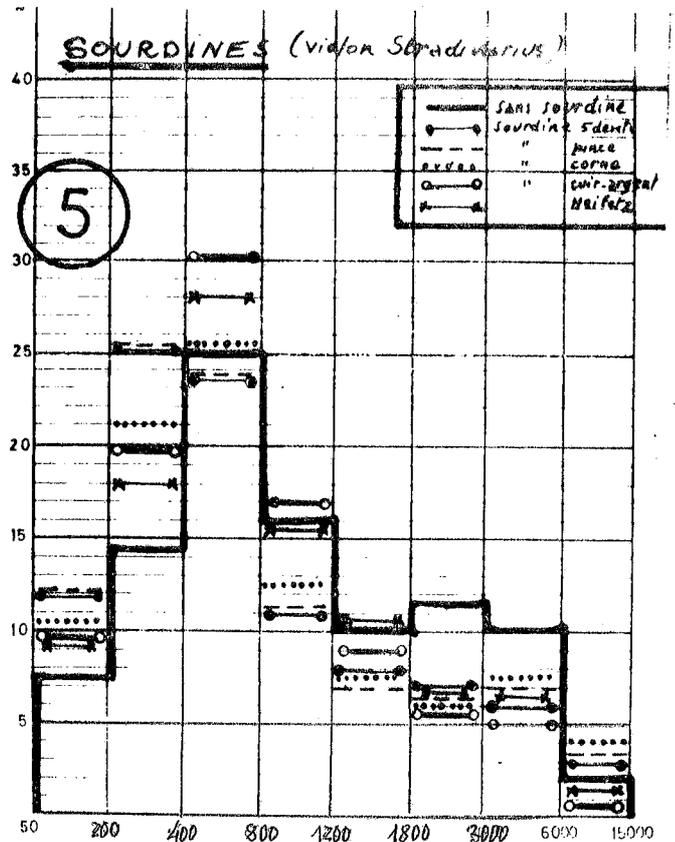
3c

Un exemple de diagramme IDS

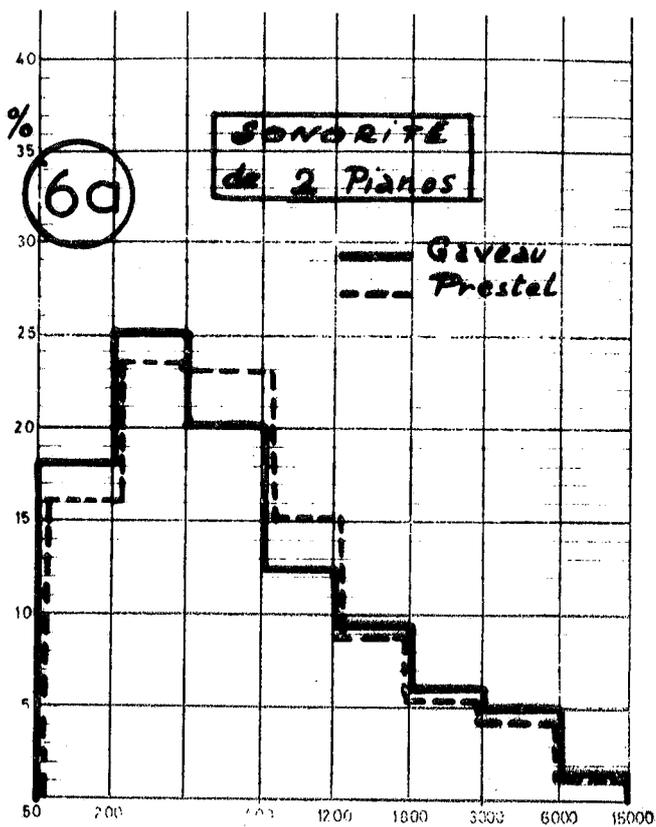
On compare la "sonorité" de 3 violons. Pour le dépouillement, on considère d'abord l'allure générale des courbes (qui donne une idée de la "balance") — puis on compare les instruments dans chaque bande.



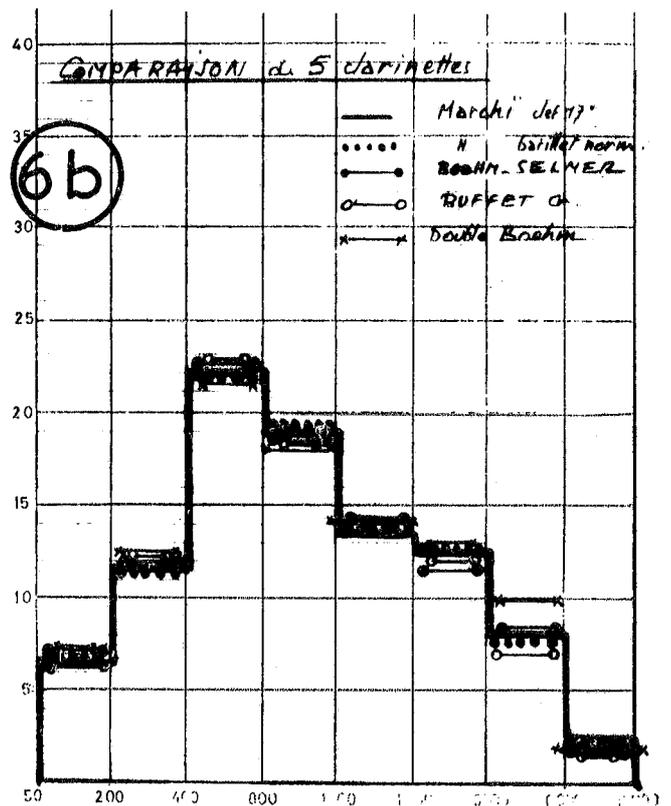
Ces trois violons ont une "sonorité" très différente....



La sourdine est un "filtre": on lit l'efficacité de chacune,



Le piano Prestel est "plus clair": cela se lit aisément.



Les 5 clarinettes sont différentes, mais le musicien est habile: il modifie son jeu pour les faire "sonner" identiquement!

visuelle, du diagramme peut présenter de gros avantages.

Autre point à signaler : pour des raisons de recherche, on peut désirer modifier la sensibilité de ~~tel~~ bande sensible. C'est possible ici : un bouton de réglage est prévu pour cela en dessous de chaque bande. De même, on peut, en cas de besoin, modifier les limites de coupure des bandes.

Bref, tel qu'il est, cet appareil est désormais opérationnel, et je l'ai déjà utilisé pour de très nombreuses recherches où le problème de "sonorité", de "coloration", de "balance spectrale" de toutes sortes d'évènements sonores informationnels (parole, musique, bruit etc...) sont en cause. J'ai déjà donné ailleurs quelques résultats (bib. 7a à h). Voici à présent un tour d'horizon général sur les problèmes que j'ai traités.

III. QUELQUES APPLICATIONS DE L'IDS

J'ai précisé plus haut que mes motivations de chercheur, à l'origine, étaient essentiellement musicales et d'ordre pratique. Il s'agissait en particulier de mettre sur pied une méthode pour définir objectivement la "qualité" d'un instrument de musique, c'est-à-dire, en dernière analyse, sa "sonorité", sa "coloration", sa "balance spectrale". Ces tentatives, je l'ai dit, se sont soldées par un échec. Je disposais bien du sonographe pour visualiser les sons musicaux dans leur contexte, pour étudier leur "forme" mais il manquait précisément l'appareillage pour apprécier leur couleur et jauger la "sonorité" globale. J'avais laissé en sommeil de très nombreux problèmes; l'IDS permet de les reprendre à présent. Voici quelques exemples précis et démonstratifs.

1°) SONORITE DES INSTRUMENTS DE MUSIQUE. L'IDS va nous aider à définir la "coloration" particulière de tel ou tel violon par exemple. Prenons un enregistrement d'une longue séquence musicale (Concerto de violon de Max BRUCH, qui exploite bien la totalité des possibilités d'un violon). Un virtuose du violon (Blaise CALAME) a joué sur trois violons le même passage (4 minutes) dans les mêmes conditions de local (notre petite "salle sourde"). Les instruments sont : un Stradivarius (le Mendelssohn, de Blaise CALAME), un violon de ma fabrication et un violon de SAVART. Ce dernier est le fameux violon trapézoïdal fabriqué par le physicien SAVART, et au sujet duquel nous avons longuement parlé lors d'une précédente réunion du GAM sur ce thème (Bulletin GAM N°57; 1971). L'IDS nous donne trois diagrammes (fig.4), qu'il est tout à fait aisé de mettre en parallèle et de raccorder effectivement avec la "sonorité" de chaque instrument.

A l'oreille, deux des trois violons ont une similitude de coloration très nette : le Stradivarius et le violon LEIPP, ^{Ce dernier} à une sonorité un peu plus "sombre", moins "claire". Le diagramme IDS montre cela avec évidence : le violon LEIPP est très nettement plus intense dans les bandes suivantes : 400-800 ; 800-1200 ; 1200-1800 c'est-à-dire dans les bandes du médium grave, du médium et du médium aigu. Par contre le Stradivarius présente un gain considérable (presque 100 %) dans les bandes du suraigu et de la stridence. Comme une salle de concert "rongée" habituellement de façon plus ou moins forte ces deux régions suraiguës, il est évident que, dans les conditions normales d'emploi, le violon de Stradivarius sera plus efficace que l'autre. De toutes façons la sonorité des deux instruments est différente. On peut préférer l'un ou l'autre selon l'oreille que l'on a, selon qu'on joue soi-même l'instrument ou qu'on l'écoute à distance dans une salle de concert etc... Mais une chose est sûre : avec le diagramme IDS on dispose d'un document objectif qui permet de chiffrer et de comparer les "sonorités" comparatives entre instruments de musique!...

Observons encore le violon de SAVART, à qui tout le monde reproche une sonorité qui manque de "corps", qui est "verte" (un terme utilisé par les violonistes pour dé-

signer un instrument déficient dans le médium et à prédominance trop marquée d'aigu et de suraigu). Le diagramme du SAVART confirme les avis subjectifs : déficience importante dans le médium grave et le médium; "gonflement" énorme du médium aigu et de l'aigu...

Voilà donc des diagrammes "parlants", où la qualité comparative des sonorités est facile à juger, éventuellement à mesurer en grandeurs physiques si cela présentait un intérêt. On notera que dans ces diagrammes les ordonnées représentent des amplitudes; mais on peut facilement transformer ces amplitudes en énergie ou en niveaux (dB) : dans tous les cas, les allures comparatives des courbes resteront de toute façon identiques.

En résumé, les diagrammes IDS apportent bien le complément d'information qui me manquait à l'époque où je tentais la mise au point d'une fiche caractéristique des violons...

Voici un autre exemple (fig.5). On sait qu'une sourdine de violon (par définition) "assourdit" le son, c'est à dire filtre plus ou moins l'aigu et le suraigu. Selon le type de sourdine, cet assourdissement est variable, les différences étant très nettement perceptibles à l'oreille. Prenons donc 5 sourdines de structure et de matériaux très différents. Demandons ensuite au violoniste de nous rejouer la pièce de musique choisie précédemment, d'abord sans sourdine (trait plein, gros) puis avec les cinq sourdines en cause. Les diagrammes IDS comparatifs se passent pratiquement de commentaires. Les sourdines filtrent bien différemment le timbre statistique du violon. Chacune donne sa "couleur" propre à la musique. et le musicien n'a plus qu'à choisir celle qui lui plaît le mieux, compte tenu de l'idéal esthétique de coloration qu'il recherche et de son oreille personnelle. Grâce à l'IDS, l'acousticien comprendra le choix fait par le musicien et saura chiffrer les différences de coloration.

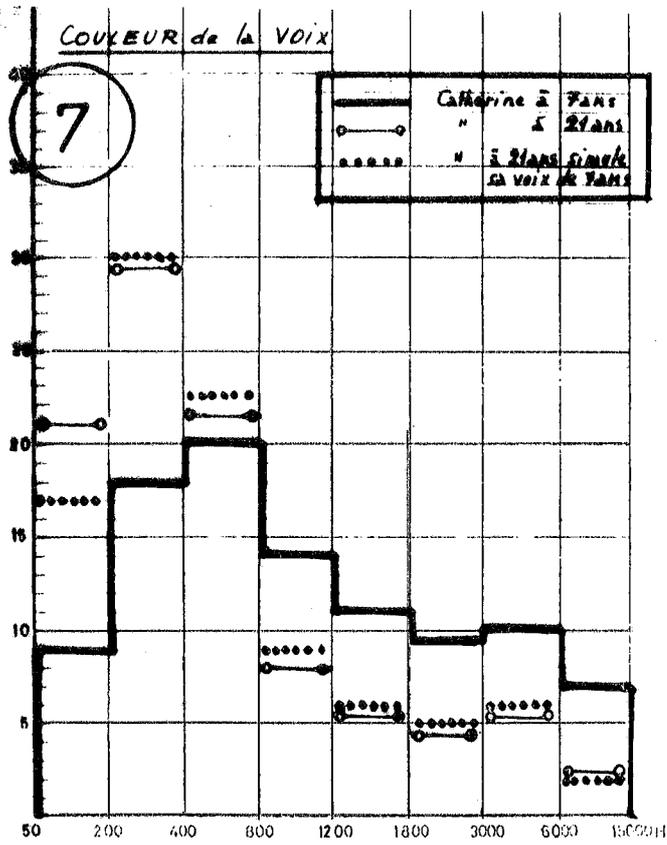
Par ailleurs, l'IDS apporte une réponse dans tous les domaines de la lutherie expérimentale et fournit un outil de contrôle au fabricant d'instruments qui désire savoir ce qu'il fait, contrôler sa fabrication du point de vue de la coloration sonore des instruments, et la comparer avec celle des autres fabricants. La figure 6a donne l'exemple de deux pianos à sonorité très différente, l'une plus "sombre", l'autre plus "claire", plus colorée. Ces diagrammes coupent court à toutes les discussions sans fin qui se produisent continuellement entre auditeurs dont on ne connaît ni l'oreille ni les habitudes auditives : ici on sait de quoi on parle.

(MARCHI)

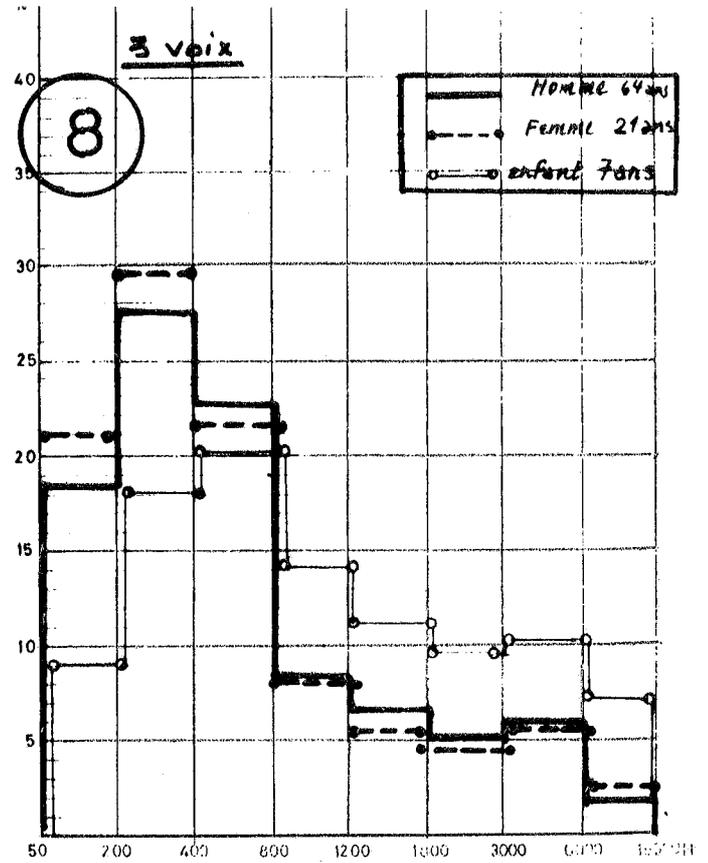
Prenons à présent un autre cas intéressant. Un virtuose de clarinette vient d'inventer un perfectionnement important de l'instrument. Il faut savoir si cette modification n'altère pas la "sonorité de clarinette" à laquelle nous sommes habitués. Le musicien vient au Laboratoire avec cinq instruments différents, dont celui qu'il a modifié. Il joue deux pièces caractéristiques pour la clarinette (une lente et une rapide : concerto en sol de Mozart et pièce de concours de Messager). En relevant les diagrammes IDS, on vérifie (Fig. 6b) que les "sonorités" sont extraordinairement similaires, la seule différence notable se situant dans la bande de 3000-6000 Hz.

On peut tirer de ces diagrammes d'intéressantes conclusions!

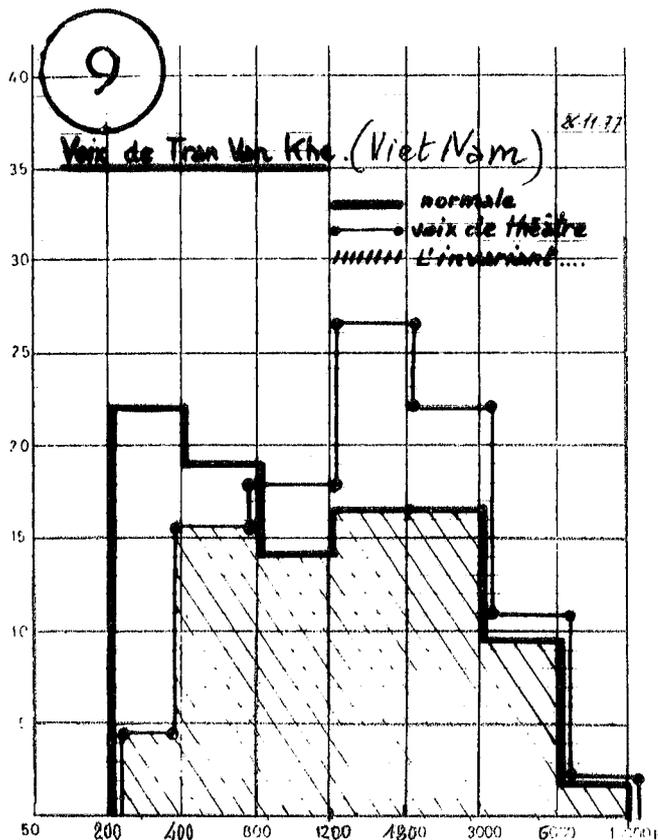
Il est certain que dans ce type d'instruments, et j'ai eu l'occasion pendant de longues années de l'expérimenter "à l'oreille", c'est surtout le musicien, l'anche et le bec, c'est-à-dire le système excitateur, qui déterminent la couleur du son. Je l'ai encore vérifié tout récemment et aurai l'occasion d'en reparler lors de la réunion du GAM avec MARCHI (en février 1978). Mais ce qu'il était important de montrer, c'est que, toutes choses égales (musicien, anche, bec, local) le clarinettiste habile est capable de produire sur diverses clarinettes la même "sonorité", à peu de choses près. En tout cas, grâce à l'IDS, MARCHI a pu démontrer que la modification qu'il a apportée à l'instrument ne change en rien sa sonorité pour peu que l'on maîtrise la technique de jeu suffisamment.



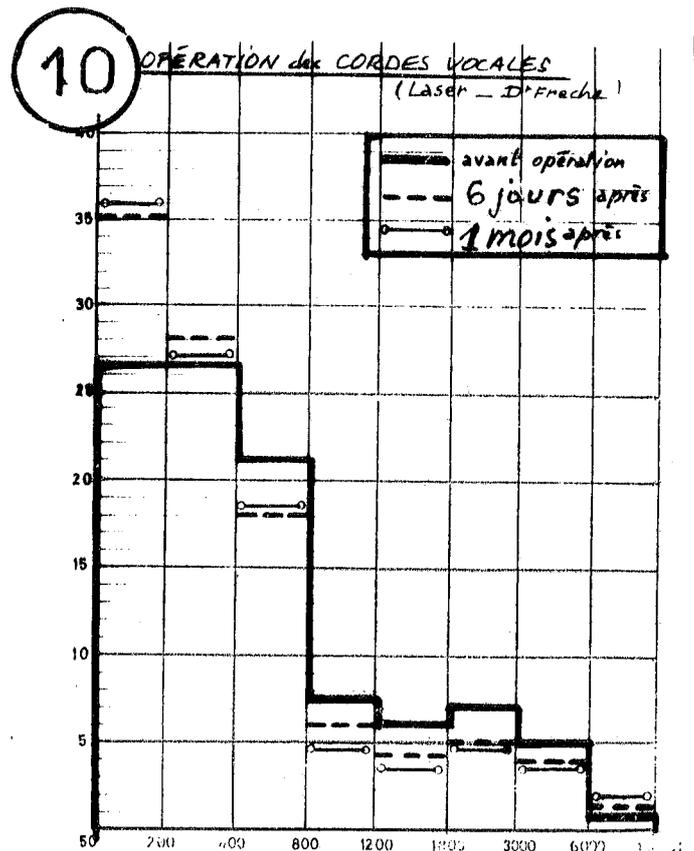
La "coloration" de la voix change avec l'âge! en voici la démonstration



La "balance" de ces 3 voix ne se ressemble guère!



En "voix de théâtre" la couleur change énormément...



L'IDS permet un contrôle objectif de la voix après opération ou rééducation.

Complétons ce rapide panorama des possibilités de l'IDS dans le domaine instrumental par un autre exemple. Nous avons fait de très nombreuses comparaisons de sonorités de guitares - dont nous avons parlé tout récemment lors du GAM sur l'Acoustique de la guitare (n° 93; oct. 1977). La figure 6c compare deux guitares : une normale et une guitare expérimentale de FRIEDERICH. Chacun vérifiera que la "sonorité" n'est pas la même, et localisera les points où les deux instruments diffèrent.

On pourrait multiplier les exemples; ceux-là suffisent pour montrer tout l'intérêt de l'IDS dans l'appréciation objective de la qualité de sonorité des instruments de musique, c'est-à-dire dans le domaine de la fabrication ou de la comparaison des sonorités (concours de sonorité !!).

- 2°) COLORATION DE LA VOIX HUMAINE. Comme on va voir, les diagrammes se passent presque de commentaires. Regardons la figure 7 qui montre les diagrammes des voix de 3 locuteurs récitant le même texte. Les différences sont mises en évidence sans ambiguïté : la coloration diffère notablement entre un homme, une femme et un enfant!

Voici un autre cas particulièrement intéressants ! La figure 8 représente les trois diagrammes IDS de la même personne, récitant la même récitation. C'est d'abord le sujet lorsqu'il avait 7 ans (trait plein). Il n'y a pas de "basses", peu de grave, beaucoup de médium aigu, d'aigu, de suraigu et de stridence. Ce sont là les caractéristiques bien connues de la voix d'une petite fille, à la voix assez "claire". Puis cette petite fille a grandi : à 21 ans elle récite la même récitation (enregistrements faits avec magnétophone professionnel NAGRA). Les cavités vocales se sont agrandies, les cordes vocales aussi. La "couleur" de la voix vire au grave. On peut voir, dans chaque bande sensible, ce qui s'est passé : gonflement énorme des basses et du grave, chute de tout ce qui est au-dessus de 800 Hz. Les différences sont aussi énormes à l'oreille que sur le diagramme !

Finalement j'ai demandé à cette même jeune personne de réciter la même récitation, mais en essayant au mieux de simuler la voix qu'elle avait à 7 ans. Malgré tous ses efforts, elle n'y arrive bien entendu pas pleinement... Elle réussit bien à "baisser" un peu la tonalité dans la bande des basses, à "remonter" les bandes situées au-dessus de 800 Hz. Mais elle est fort loin de pouvoir retrouver sa voix d'enfant, quels que soient ses efforts! Comme on le voit, la coloration de la voix est donc aisée à objectiver avec l'IDS, et il est certain qu'on tient là un moyen intéressant pour dépasser les simulateurs par exemple. Mais de ce point de vue, toute une étude reste à faire, qui est en cours, pour chercher à définir dans quelle mesure un locuteur est capable de changer la coloration de sa voix. Voici de ce point de vue un exemple tout à fait intéressant.

Notre ami TRAN VAN KHE, musicien vietnamien (Directeur de recherche au CNRS...) avait appris dans son jeune âge à jouer du théâtre vietnamien, où les acteurs "forcent" leur voix de façon très particulière (coloration très aiguë). TRAN VAN KHE nous récite alors un texte en voix normale, en vietnamien bien sûr; puis il répète le même texte en "voix de théâtre", le diagramme IDS (fig. 9) est d'une éloquence toute particulière : la balance sonore est en effet totalement modifiée. Mais, point important, les deux diagrammes ont une région commune : cette région représente l'invariant de la couleur de sa voix, qui caractérise le locuteur, même s'il travestit sa voix. On voit tout l'intérêt de l'IDS dans le problème - non résolu - de la reconnaissance d'un locuteur!

Voici enfin un autre exemple tout à fait intéressant. Nous avons eu le plaisir d'être invités récemment par le Dr FRECHE à assister à plusieurs opérations de cordes vocales avec rayon laser : une technique nouvelle, révolutionnaire, que le Dr FRECHE vient de mettre au point. Avant l'opération, les sujets étaient enregistrés (discours libre de quelques minutes) par l'orthophoniste (Melle LEVY MANGEDL) chargée de la

rééducation ultérieure des opérés des cordes vocales. Les enregistrements étaient donc faits avant l'opération, puis six jours après et un mois après en fin de rééducation. On voit sur la figure 10 un exemple où l'on note la l'extraordinaire amélioration de la voix après l'opération. Auparavant, cette voix était franchement pathologique (voix sans basses, éraillée, criarde, etc...), toutes caractéristiques qui apparaissent clairement lorsqu'on compare le diagramme en trait plein (avant opération) avec les deux autres diagrammes, relevés après l'opération, où la voix a retrouvé une couleur plus grave, moins éraillée. L'IDS apporte donc un moyen puissant de contrôle des résultats après opération, ainsi d'ailleurs qu'en cours de rééducation : partout où la coloration de la voix est en cause, il est désormais possible d'objectiver ce qui se passe.

- 3°) HAUTE FIDELITE. C'est le domaine où l'intérêt de l'IDS est peut être le plus évident et le plus immédiat. Je me suis longuement expliqué sur cette question aux Journées d'Etude du Festival International du Son de Paris, en mars 1977 (bib.7d). Je me contenterai de rappeler ici quelques exemples.

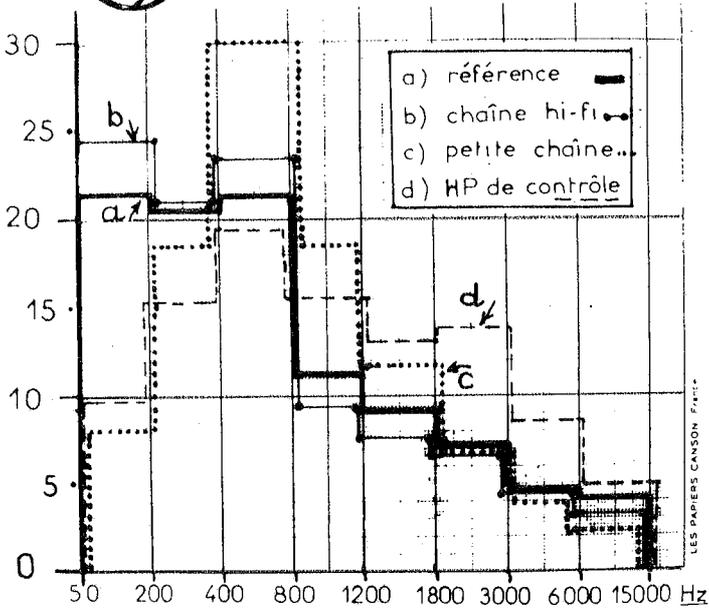
Les spécialistes de la haute-fidélité disputent depuis des décennies sur l'appréciation de la qualité sonore des chaînes d'écoute ou des maillons qu'ils fabriquent. Ils parlent couramment de la "coloration" particulière de telle ou telle enceinte de tel ou tel haut-parleur. De nombreuses méthodes de tests ont été proposées, basées sur la métrologie acoustique classique. Le problème n'est visiblement pas résolu, et les spécialistes continuent à se disputer... Certains d'entre eux en sont revenus purement et simplement aux tests subjectifs, où l'on demande à des sujets de formuler leur avis après audition d'un disque d'essai spécial sur diverses chaînes. Il est bien évident que la méthode des tests subjectifs ne peut apporter de réponse satisfaisante ici, surtout si on n'a pas pris au préalable la précaution de relever l'audiogramme des sujets, la fréquence de coupure aiguë de leur oreille, et le pouvoir séparateur temporel de leur système auditif. De toutes façons, les discussions "subjectives" seront éternelles, puisque "des goûts et des couleurs on ne peut discuter". Mais l'IDS va nous apporter sa réponse!

Prenons un disque de musique quelconque, d'orchestre de préférence. Relevons directement ce qui est gravé sur le disque (Fig.11a) en passant de la platine directement sur l'IDS (gros trait plein) : ce sera la référence ultérieurement. Puis passons le même disque sur trois chaînes de "fidélité" variable. L'une (b) gonfle un peu trop les "basses, que l'autre (c) "ronge" totalement... L'une gonfle le suraigu (d) dans la bande de 3 à 6000 Hz) etc... Bref, la comparaison de chaque diagramme de chaîne avec la référence nous apporte la réponse tant désirée par les spécialistes de la HIFI. Voici bien la "balance sonore", la "coloration" clairement mises en évidence. En cas de besoin, l'IDS apporte même un moyen de "mesurer" aussi le taux de "fidélité". Ce taux représente l'écart, dans chaque bande, entre la référence (ce qu'a voulu le preneur de son...) et ce que rayonne la chaîne! Je n'insisterai pas : un spécialiste vient de faire toute une série de recherches ici pour comparer des baffles du commerce en utilisant l'IDS, qui représente l'appareil de choix pour définir la sonorité d'un baffle. (M. Carfantan, qui communiquera ses résultats au Festival du Son, en mars 1978.

Autre exemple : la figure 11 b objective l'efficacité des filtres passe-haut et passe-bas d'un amplificateur de chaîne. Le diagramme IDS matérialise le "champ de liberté" de correction de la tonalité de la chaîne! Cette figure se passe de commentaires

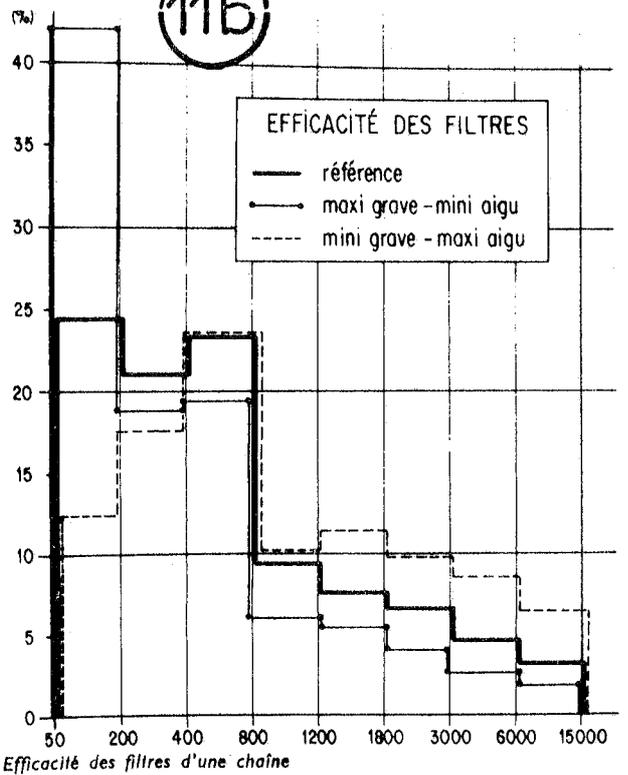
- 4°) PROBLEMES DE LA DIRECTIONNALITE D'UNE SOURCE SONORE. De nombreux spécialistes de l'acoustique musicale se sont penchés sur la directionnalité des instruments de musique, dont les effets sont importants lorsqu'un instrumentiste joue devant un public dans un local d'écoute. Nous avons déjà organisé une réunion sur ce thème de directivité des instruments avec Jürgen MEYER (voir bib.8). En fait, le problème de la directionnalité n'est pas résolu, car les moyens métrologiques et les méthodes mis en oeuvre

11a



La "Fidélité" se mesure par rapport à la courbe de référence (ce qu'a voulu le preneur de son.)

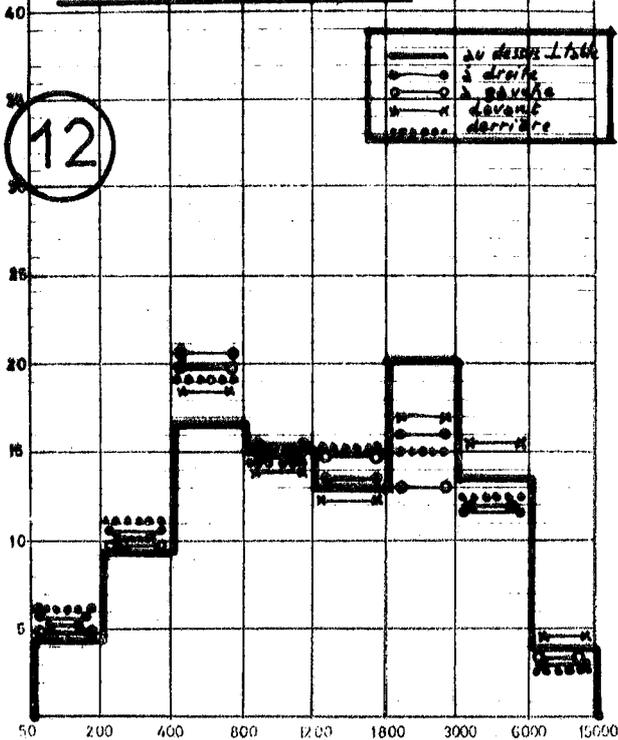
11b



Efficacité des filtres d'une chaîne

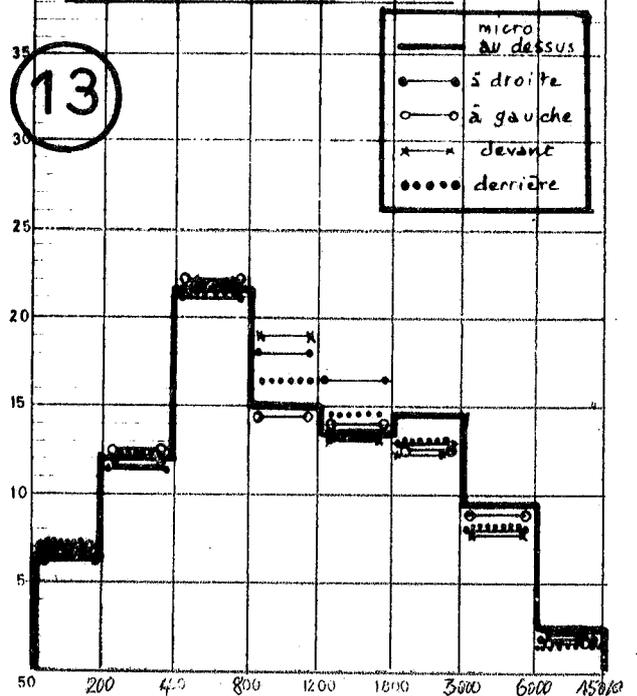
L'efficacité des Filtres est mise en évidence...

DIRECTIONNALITÉ d'un VIOLON (Stradivarius)

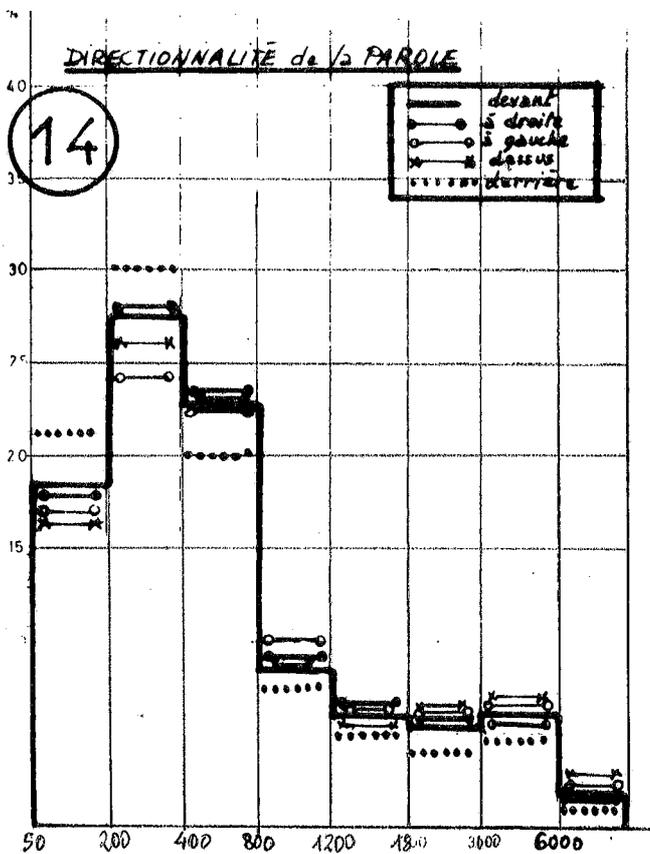


Un instrument est toujours plus ou moins directionnel: le diagramme IDS le montre

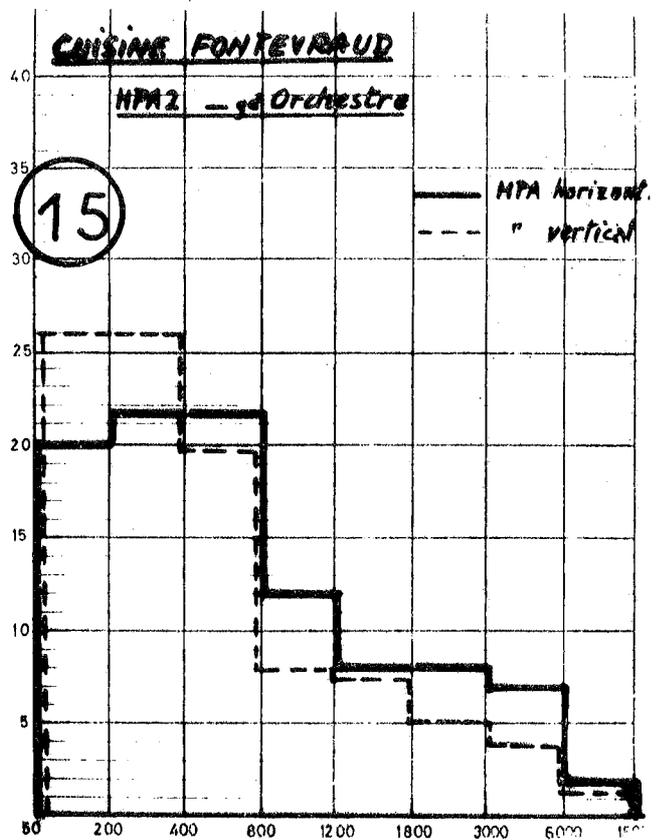
DIRECTIONNALITÉ CLARINETTE



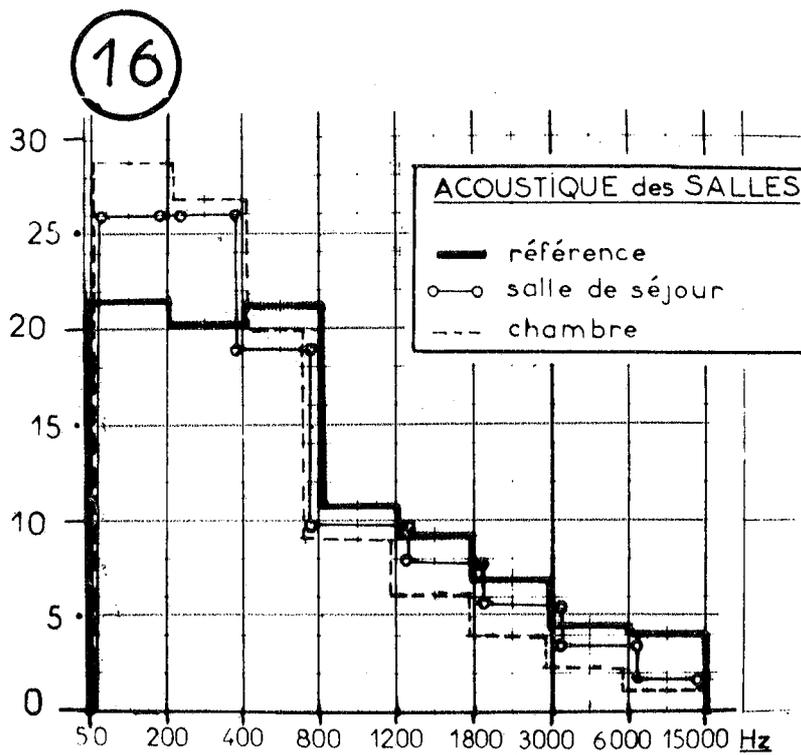
L'énergie sonore rayonnée une clarinette varie selon les bandes sensibles.



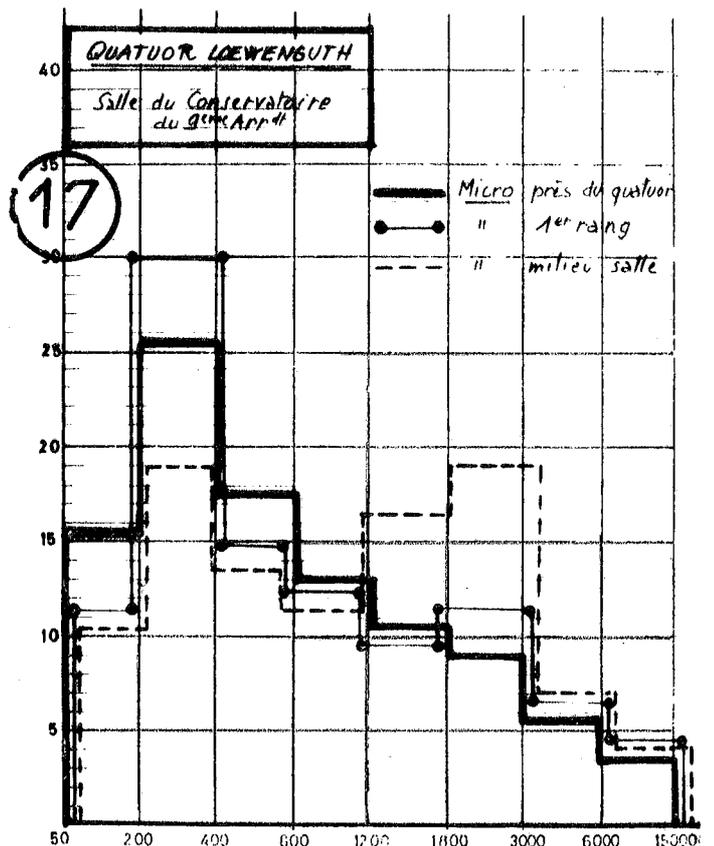
La couleur de la voix est plus sombre vers l'arrière...



L'orientation du haut-parleur change beaucoup sa "coloration"



D'une pièce à l'autre la coloration du baffle change notablement.



La qualité de l'écoute diffère fortement selon les places.

vre ne permettent de faire que des relevés et des diagrammes à des fréquences isolées et pour des sons stables. Le vrai problème de la directionnalité doit, à mon sens, être posé autrement. Lorsqu'un violoniste ou un autre instrumentiste fait une prestation dans les conditions normales, l'important est de savoir, quelle quantité d'énergie est rayonnée statistiquement par son instrument dans les diverses directions. Pour le savoir, prenons l'IDS et opérons de la façon suivante.

Le musicien s'installe dans une chambre silencieuse (de préférence à la chambre sourde où il ne "s'entend plus jouer") et exécute une pièce caractéristique pour son instrument. On dispose 5 microphones autour du musicien (devant, à droite, à gauche, au-dessus et en arrière du joueur), et on fait donc cinq enregistrements simultanés. Il suffit alors de relever le diagramme IDS pour chaque enregistrement (fig.12). Le dépouillement visuel va de soi, et nous n'avons plus besoin d'insister sur ce point: les différences perçues de "sonorité" dans les diverses directions sont totalement corroborées par les diagrammes IDS. Dans le cas présent (Stradivarius, joué par Blaise CALAME) on notera en particulier que l'instrument "sonne" très différemment selon la direction où se trouve l'auditeur. C'est évident à priori; mais ici on a une preuve tangible, mesurable le cas échéant.

Nous avons fait de nombreux autres relevés similaires avec d'autres instruments et même avec des baffles, dont la directionnalité est ainsi définie de façon réaliste. Ainsi, la Figure 13 donne les résultats obtenus avec un clarinettiste. On ne peut que répéter ce qui a été dit pour le violon: l'IDS fournit l'outil d'étude qui manquait. Vérifions-le encore pour la parole.

La directionnalité de l'appareil phonatoire est aisée à préciser: la figure 14 en donne un exemple. Le locuteur est M. LEIPP. On notera en particulier la chute de l'aigu, du suraigu et de la stridence lorsqu'on est placé en arrière du locuteur, ainsi que le "gonflement" corrélatif de la balance vers le grave et les basses.

Voici pour finir encore un exemple (Fig.15). On a diffusé des séquences d'orchestre et d'autres musiques avec un baffle donné, dans un local historique (cuisines de Fontevraud), en orientant le baffle d'abord dans le sens horizontal, puis dans le sens vertical. L'enregistrement de ce qu'on percevait en un point donné du local, montre avec évidence que la coloration du baffle change fortement selon son orientation. Les basses et le grave sont considérablement "gonflés" lorsqu'on oriente le baffle vers le plafond; corrélativement le médium et l'aigu et le suraigu sont fortement atténués. Conclusion: la coloration globale de la musique dépend largement de l'orientation du haut-parleur!

Ces quelques exemples sont certes assez démonstratifs de l'intérêt de l'IDS dans le domaine de la directivité des sources sonores: je n'insisterai donc pas.

- 5°) ACOUSTIQUE DES SALLES. Ce qui précède (Baffle à Fontevraud) est en fait déjà un exemple d'utilisation de l'IDS pour tester les effets d'un local sur la coloration d'un événement sonore qu'on y diffuse. J'ai déjà eu l'occasion de signaler l'intérêt de l'IDS dans l'étude de la qualité des salles destinées à la musique et à la parole en particulier (Bulletin GAM; bib.7d). Le but de mes recherches en ce domaine est la mise au point d'une méthode pour tester la qualité sonore d'une salle en fonction de ce qu'on se propose d'y faire (animation, musique, parole). Le plus logique était de concevoir et de fabriquer un baffle autonome, alimenté par des accumulateurs, et de préparer une bande-test comportant des échantillons de ^{mêmes} tous les types de musique possibles (orchestre, clavecin, chœurs, piano, etc...). Ces échantillons sont alors diffusés dans chaque local, et on enregistre ce qui est perçu en divers points d'un local donné pour diverses positions du baffle. Avec M. SAPALY, nous avons fait ainsi de nombreux relevés, et de nombreux exemples ont été donnés lors de la réunion du GAM sur

le thème "Acoustique et Animation : le cas Fontevraud; oct.1976". Revenons sur un cas précis (fig.16).

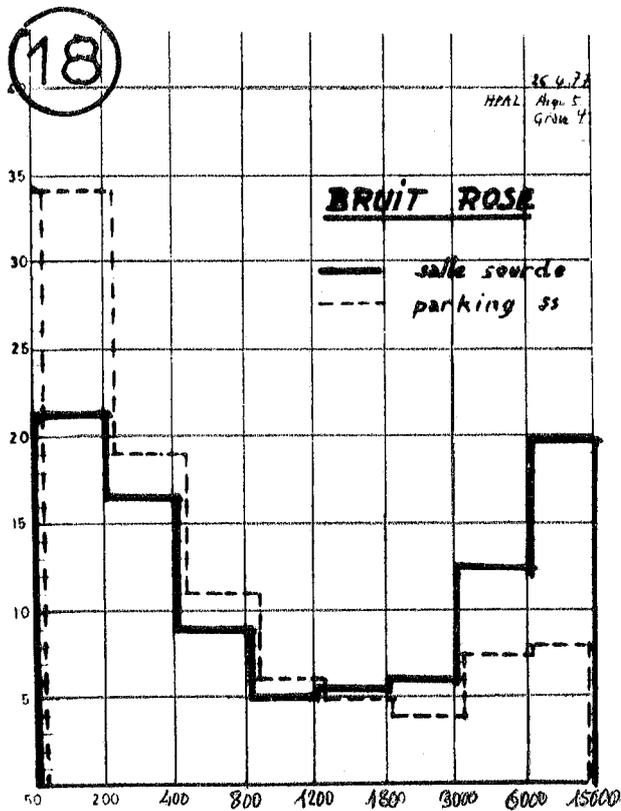
Un orgue portatif était installé dans la Chapelle St LAZARE, à Fontevraud. Une oeuvre musicale caractéristique, bien sélectionnée, a été enregistrée simultanément de près et de loin lors du concert, la salle étant entièrement occupée. On a ensuite demandé à l'organiste de rejouer la même pièce, la salle étant vide de ses auditeurs (enregistrement simultané, encore réalisé, de près et de loin). Les diagrammes IDS confirment et objectivent les impressions subjectives que nous avons ressenties du point de vue de la balance spectrale, soit sur le terrain, soit à l'écoute des enregistrements au laboratoire. Ils sont tout à fait instructifs quant aux différences entre les théories et la réalité acoustiques... Ainsi, on soutient par exemple couramment que le public absorbe telle ou telle région fréquentielle, les basses, les graves en particulier. En observant les diagrammes IDS comparatifs entre salle pleine et vide on voit que les choses ne sont pas si simples. En tout cas l'IDS apporte la réponse en ce qui concerne la coloration apportée par les salles dans les conditions normales d'emploi!

Dans la grande salle du Conservatoire du 9^e Arrondissement de Paris, le Quatuor Loewenguth (instruments CAMURAT) joue le quatuor "La jeune fille et la mort" de Schubert. L'enregistrement était fait simultanément en trois points, lors du concert (salle occupée, pleine) : au niveau des exécutants (c'est ce qu'entendent les quartettistes), en avant, au premier rang de la salle; puis vers le milieu de la même salle. Les diagrammes (fig.17) sont éloquentes! Les musiciens n'entendent pas du tout la même coloration, la même "sonorité", que les auditeurs. Les auditeurs placés devant et derrière n'entendent pas du tout la même "balance sonore". La salle en question comporte donc de "bonnes" et de "mauvaises" places! L'IDS permet de voir quelles places se rapprochent davantage de l'idéal coloré voulu par les musiciens (c'est-à-dire de la courbe en trait plein épais, qui représente ce que font, ce que veulent les musiciens).

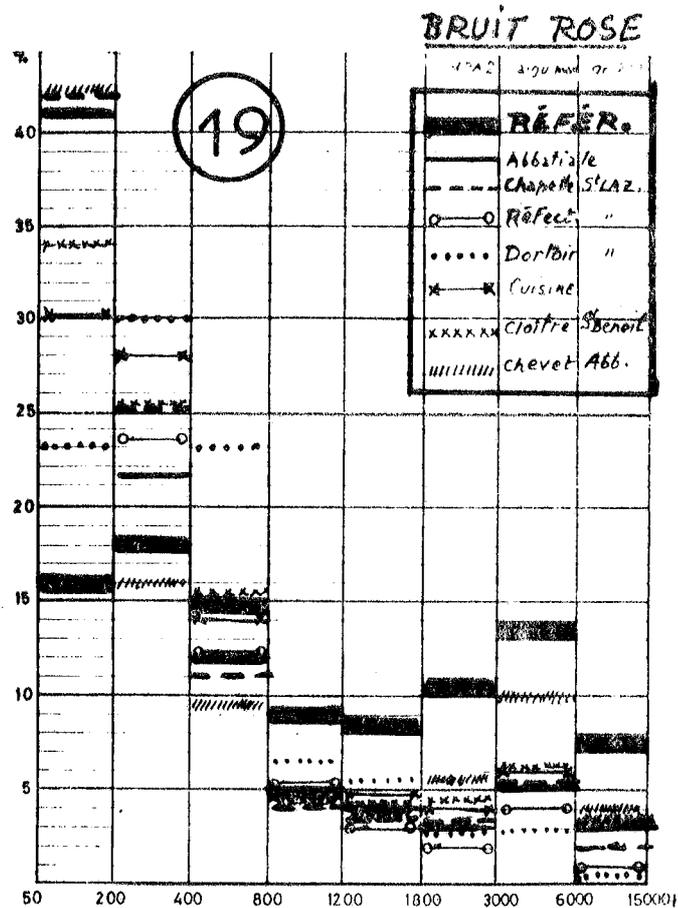
Je suis actuellement en train de faire une recherche pour voir s'il ne serait pas possible de prédire la qualité de sonorité d'une salle pour telle ou telle musique à partir d'artefacts acoustiques (bruit rose, clics etc...). L'IDS est l'outil de base pour cette recherche en cours! A titre d'exemple, voici (fig.18) un "bruit rose" diffusé par un baffle autonome dans notre petite salle sourde (trait plein), et le même bruit rose diffusé par le même baffle dans un local très "sonore" (le parking souterrain vide de l'Université de Paris VI). La modification de la "sonorité" est énorme : le parking gonfle démesurément les basses et filtre toute la région aiguë située entre 1800 et 15000 Hz... Les expériences préalables ont montré qu'à partir des altérations du bruit rose, il est possible de prédire ce que deviendra en ce local telle musique comportant peu ou beaucoup de basses, de grave, de médium, d'aigu ou de suraigu. Je reviendrai sur cette question ultérieurement; je la crois importante!

Prenons encore un exemple montrant le rôle déterminant de la "sonorité" d'un local (fig. 19). Le même bruit rose est diffusé par le même baffle autonome dans divers locaux de Fontevraud (Abbatiale, Chapelle St Lazare, réfectoire St Lazare, Dortoir St Lazare, Cuisines, Clôître St Benoit, Chevet de l'Abbatiale). Visiblement, la même musique jouée en ces divers lieux ne "sonne" pas du tout de la même manière. Ici les basses sont fortement filtrées (Dortoir St Lazare), là elles sont gonflées (réfectoire St Lazare)! Si un chef d'orchestre sait bien ce qu'il veut, on peut, grâce à l'IDS lui proposer d'heureuses suggestions pour choisir les locaux ou la place des musiciens convenant à l'oeuvre qu'il se propose de faire jouer.

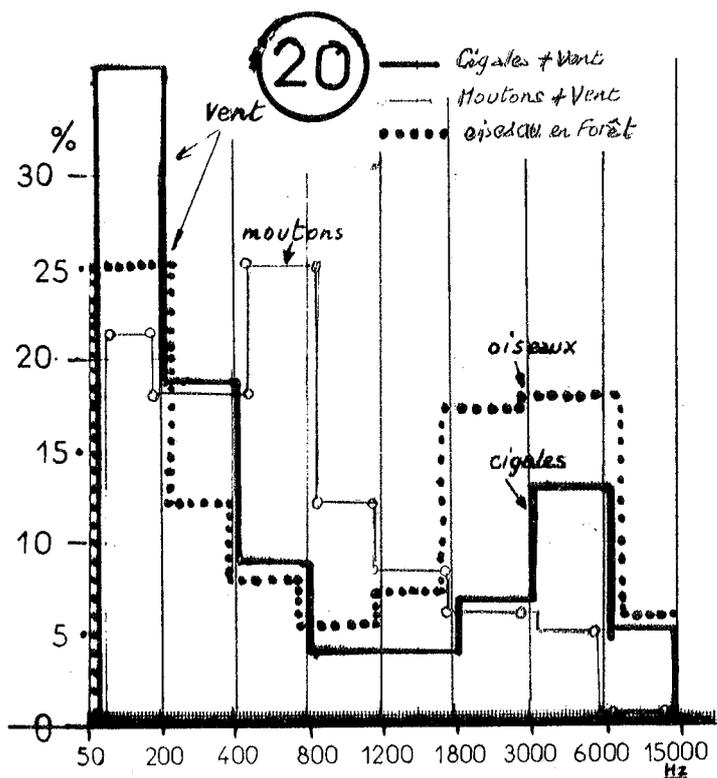
Ces quelques exemples montrent tout l'intérêt de l'IDS dans le domaine de l'acoustique, de la qualité sonore, de la coloration des locaux d'écoute.



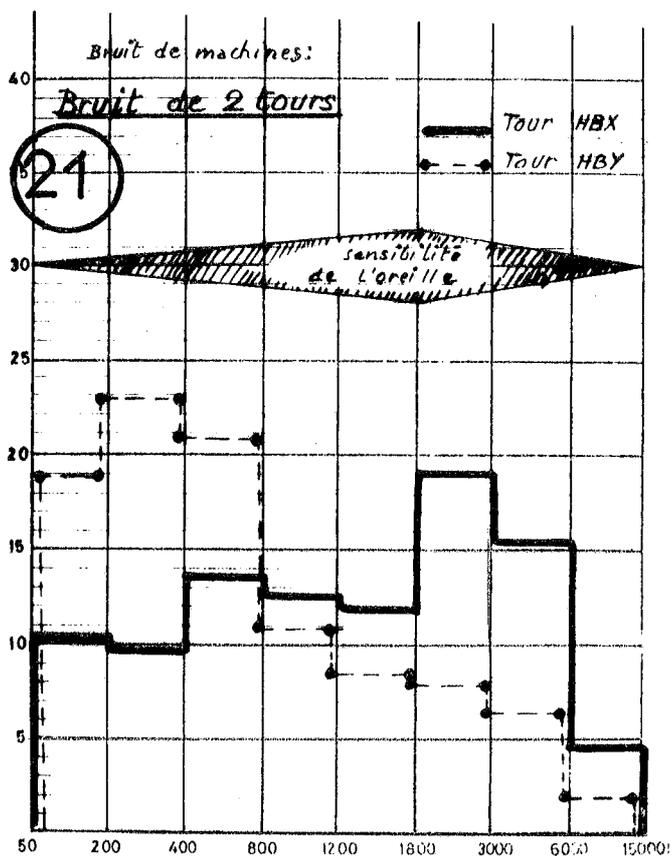
Un local réverbérant (parking souterrain) modifie complètement la balance du bruit rose.



Chaque local a sa couleur propre!



La couleur de chaque bruit de fond possède son originalité propre.



Le bruit d'un des tours est beaucoup plus nocif.

6°) ETUDE DES BRUITS DE FOND, DES BRUITS DE MACHINES. Nous sommes noyés dans des bruits de fond, agréables ou non, mais qui ont tous des "couleurs" particulières que les musiciens et les poètes cherchent à décrire ou à suggérer de diverses façons, les uns par des "sonorités" musicales (Symphonie Pastorale de Beethoven, PACIFICUS de HONEGGER etc.), les autres par des vocables plus ou moins suggestifs! Mais la "stridulation azurée" des cigales, l'"éblouissant ramage des petits oiseaux dans la forêt" au lever du soleil, la "lugubre plainte du vent"... que recouvrent donc tous ces vocables? Pour le savoir, n'est-il pas plus efficace d'emporter un bon magnétophone et d'enregistrer de longues séquences de bruits de fond, dans la nature, dans le métro, au supermarché, à l'usine, dans la cour de récréation, sur le boulevard périphérique de Paris, puis de relever des diagrammes IDS. Quelle est l'allure du bruit de fond dans l'olivieraie de Saint Jean du Gard, où chantent les cigales; sur la cause du Méjean où gémissent les moutons; dans la forêt de Fontainebleau, au printemps, où concercentent des oiseaux? Au retour, on tirera les diagrammes de densité spectrale intégrée! On verra bien (fig.20) que notre oreille ne nous a pas trompés! Les "colorations" de ces bruits de fond varient à l'infini, et ont, chacune, des caractéristiques bien particulières, que traduisent souvent assez bien les vocables des poètes ou la musique des compositeurs, romantiques, - mais bien mieux encore les diagrammes IDS.

Il est bien inutile d'en dire davantage : chaque diagramme IDS traduit bien ce que nous ressentons lorsque nous sommes plongés dans un certain bruit de fond! L'intérêt pratique de l'approche des bruits de fond à l'IDS est évident. J'ai étudié autrefois le problème de l'émergence des signaux d'avertissement sur les bruits de fond : le cas des sifflets imaginés par les divers usagers placés dans des bruits de fond particuliers et tout à fait instructif (chef de gare de chemin de fer, arbitre de match de foot-ball, agent de police etc.). L'expérience montre que les fabricants de sifflets ont carné empiriquement le problème de l'allure statistique des bruits de fonds en cause : ils placent leurs signaux où le bruit de fond contient le moins d'énergie, obtenant ainsi le maximum d'efficacité avec le minimum d'énergie.

Au lieu d'agir empiriquement pour réaliser des appareils à signaux d'avertissement, ne serait-il pas préférable de relever d'abord le diagramme IDS du bruit de fond en présence? J'ai fait quelques essais dans ce sens qui ont montré tout l'intérêt qu'auraient les spécialistes du bruit d'adopter la notion de densité spectrale intégrée en Hit bandes.

Un autre domaine important qui relève de l'IDS, important du point de vue humain et social, est celui du bruit des machines et de leur "nuisance", pour l'oreille humaine. Entrons donc dans un atelier de mécanique! Deux tours y fonctionnent; on se plaint de la gêne et de la nuisance de l'un d'eux : l'ouvrier a des problèmes auditifs! Paradoxe : celui dont on se plaint le plus n'est pas celui qui rayonne le plus de décibels!..

Faisons donc les relevés IDS de ces deux tours (Fig.21). La balance spectrale est tout à fait différente : le premier concentre l'énergie sonore vers le grave, le deuxième entre 1800 et 3000 Hz, précisément là où l'oreille est infiniment plus sensible et plus fragile qu'entre 50 et 800 Hz. Il est dès lors évident que le deuxième tour est beaucoup plus nocif que l'autre, quoique son niveau en décibels soit un peu plus faible. Un simple relevé IDS aurait permis de le prédire et de le vérifier!...

Voici encore un autre point dans le domaine des bruits de machine où l'IDS peut apporter une solution intéressante. Tout le monde sait que lorsqu'une machine se met à fonctionner de façon anormale, l'utilisateur ou l'ouvrier qui s'en sert le remarque très rapidement "à l'oreille"! Le dysfonctionnement se traduit en effet très généralement par des modifications du bruit rayonné par la machine. Or l'IDS permet de détecter cette modification : il permet donc un contrôle du fonctionnement d'une machine, contrôle que l'on pourrait d'ailleurs fort bien automatiser, un signal d'alarme se

déclenchant dès que le diagramme IDS se trouve modifié dans une ou plusieurs bandes.

Bref, l'IDS pourrait permettre de repenser certains aspects des problèmes du bruit et de sa nuisance qui sont souvent très mal résolus parce que les appareillages utilisés en cette spécialité sont visiblement mal adaptés aux problèmes relevant de la perception auditive. Je me suis longuement expliqué sur cette question ailleurs (bib. 7 j et 7 k) : l'oreille ne traite pas l'information sonore comme le font nos appareils de physique acoustique....

On pourrait multiplier les exemples; mais ceux qui précèdent suffisent pour tirer les conclusions essentielles.

IV. CONCLUSIONS

Nous avons insisté ici sur le fait qu'un certain nombre de problèmes, ceux qui concernent la "sonorité", la "coloration", la "balance spectrale" des événements sonores de notre environnement, étaient mal ou pas résolus parce que les appareillages et méthodes conventionnels sont inadéquats dans la plupart des cas où la perception d'ordre lointain est en cause. Cette perception implique l'existence de mécanismes d'intégration de la densité spectrale au niveau de notre système auditif; et pour étudier objectivement la coloration spectrale, le plus efficace est d'imaginer et de construire des appareillages simulant ces mécanismes intégratifs. L'IDS a été conçu et construit pour cela et nous avons longuement pu expérimenter son adéquation et son efficacité en de nombreux domaines acoustiques. Les quelques exemples que nous donnons ici et les résultats obtenus nous ont montré que cet appareillage permettait effectivement de repenser de nombreux problèmes acoustiques et de leur trouver des solutions réalistes. Avantage non négligeable : les documents que fournit l'IDS sont faciles à dépouiller en fonction de la sensation auditive.

Je n'ai parlé ici que de mes recherches personnelles en ce domaine. Selon une habitude que j'estime légitime, je n'ai pas commencé par chercher à savoir ce que d'autres ont fait avant moi dans ce domaine, à copier ou à modifier des appareillages et des méthodes mis au point par d'autres chercheurs. Je pense qu'un vrai chercheur doit dépasser ce stade!

Les recherches des autres chercheurs sont intéressantes à étudier à posteriori... De toutes façons les méthodes et procédés pour relever la densité spectrale des phénomènes sonores évolutifs sont de date récente, et ce n'est que bien longtemps après mes premières recherches (1972) que j'ai pris connaissance des tentatives faites en Suède, au K.T.H., pour définir la "coloration" d'un événement sonore par JANSSON et SUNDBERG! Ces auteurs avaient publié leur méthode et leurs résultats dans la revue "ACUSTICA" (bib.9), en novembre 1975 et mars 1976. Leurs idées de départ, leurs "motivations" (musicales...) sont en fait identiques aux miennes, mais leurs appareillages, leurs méthodes et leurs démarches sont très différents. Ils utilisent à l'origine un banc de 51 filtres à largeur de bande constante (250 Hz), dont les sorties sont quantifiées par échelons de 1 décibel, et en appellent à l'ordinateur. Comme le précisent les auteurs, les "spectrogrammes moyennés" qu'ils obtiennent ainsi varient avec la fréquence fondamentale, les enveloppes spectrales et les niveaux des sons analysés. Cela signifie en fait que l'analyse statistique réalisée ainsi est beaucoup plus fine que celle que pratique l'oreille dans l'écoute à long terme. De plus, l'allure des diagrammes est fonction de l'intensité des sons. Ce sont des inconvénients (auxquels échappe l'IDS) rendant difficile sinon impossible le dépouillement des documents obtenus c'est-à-dire la mise en parallèle entre les documents et les sensations auditives. Signalons encore que dans leurs publications ultérieures, les auteurs étudient des jeux d'orgue isolés par leur méthode. Ils constatent (évidemment) que les diagrammes obtenus varient avec la pièce de musique que l'on joue sur un instrument; et ceci les conduit à jouer uniquement des gammes sur l'orgue qu'ils étudient, en

égalisant les niveaux des sons sur chaque touche etc... Or l'expérience montre que jouer des gammes, ce n'est pas jouer de la musique...

Dans leur étude la plus récente, enfin, les auteurs, constatant sans doute (comme je l'ai fait depuis bien longtemps) l'inadéquation de l'échelle logarithmique des fréquences dans les domaines de l'audition, adoptent les "bandes critiques" de Zwicker (dont j'ai parlé plus haut à propos de mon propre choix de bandes sensibles) et au lieu de gammes prennent de la musique. Mais pour éviter les ennuis venant de la directivité des instruments, ils enregistrent les instruments dans une chambre réverbérante, sensée annuler les effets de la directivité des instruments. Les auteurs comparent de cette façon des violons. Selon eux, l'intérêt de la méthode est la reproductibilité. Ce souci est légitime en physique. Mais la physique n'a que des rapports lointains avec les problèmes de perception des messages sonores... J'ai suffisamment insisté sur ce point pour ne plus y revenir.

En résumé, l'intérêt de l'IDS réside dans le fait qu'il s'agit d'un appareillage analogique travaillant en temps réel, utilisable par tous les praticiens du son concernés par l'écoute d'ordre lointain. Les documents obtenus sont faciles à raccorder avec la sensation auditive : ils sont donc significatifs et réalistes. Du fait que l'IDS n'en appelle pas à l'ordinateur et que tout le monde réussit rapidement à l'utiliser et à en dépouiller les documents, cet appareil est à la portée de très nombreux utilisateurs potentiels, à qui il est susceptible d'apporter des réponses réalistes qui font cruellement défaut en de nombreux domaines : Contrôle en fabrication et test des instruments de musique et des chaînes HI-FI, prise de son, qualité de la voix, acoustique des salles, problèmes du bruit etc... Les quelques exemples cités plus haut devraient être suffisamment convaincants!

PARIS, 17 Novembre 1977

E. LEIPP

BIBLIOGRAPHIE

- 1°) CHENANTAIS (Dr. J) - Le violoniste et le violon - Ed. DURANCE, Nantes (1927).
- 2°) LEIPP (E) - La sonorité du violon. Etude des facteurs conditionnant la sonorité des instruments du quatuor à cordes. Chez l'auteur. Paris (1952).
- 3°) LEIPP (E)
- a) L'emploi du sonographe dans la détermination de la qualité des instruments à cordes. Annales Téléc. T.14; 5-6 (1959) - Collab. LEIPP-MOLES.
 - b) Méthode objective d'appréciation des qualités d'un instrument de musique. C.R. ICA (Stuttgart 1959) - Congrès International d'Acoustique.
 - c) Objektive Bestimmung der Klangqualität bei einem Saiteninstrument Elektronische Rundschau Berlin (1960).
 - d) Les paramètres sensibles des instruments à cordes. Thèse de Doctorat de l'Université de Paris (Physique). Bib. SORBONNE, Paris (1960).
 - e) Aktuelle Probleme des experimentellen Geigenbaues Gravesaner Blätter n° 19-20, Gravesano (1960).
 - f) De l'acoustique des instruments à cordes. Annales Téléc. T.15, n° 5-6 (1962).
- 4°) LEIPP (E) - La machine à écouter. Essai de psycho-acoustique. MASSON, Paris (1977).
- 5°) LAPICQUE (C) - Essais sur l'espace, l'art et la destinée. GRASSET, Paris (1958).
- 6°) LEIPP (E) - Evaluation globale d'une chaîne haute-fidélité par analyse d'ordre proche et lointain. Journées d'Etude du Festival International du Son de Paris. Ed. JACOB, Paris (1977).
- 7°) LEIPP (E) - Publications de M. LEIPP où il est question de l'Intégrateur de densité spectrales IDS. :
- a) Apports de l'acoustique musicale à l'étude digitale des musiques ethniques : une méthode d'étude des échelles musicales ethniques avec une application pratique : " Traitement numérique des musiques ethniques " en collaboration avec M. MLOUKA.
in : Informatique musical; Journées d'Etude ERRATO. Edition du CNRS Paris, Octobre 1973.
 - b) Peut-on tester l'oreille musicienne ? Bulletin GAM N° 85, Mai 1976.
 - c) Haute-fidélité et Acoustique. Journées d'Etude du Festival du Son de Strasbourg. Ed. SIERE, Paris, Oct. 1976.
 - d) Acoustique et Animation : Le cas Fontevraud - Bulletin GAM N° 87, Oct.1976.
 - e) Evaluation Globale d'une chaîne haute fidélité. Journées d'Etude du Festival International du Son. Ed. JACOB, Paris 1977.
 - f) L'intégrateur de Densité spectrale IDS. Exposé au Groupement des Acousticiens de Langue Française, 21 Novembre 1976. A paraître dans la Revue d'Acoustique.

BIBLIOGRAPHIE (suite)

- g) Formes et couleurs des chants d'insectes. Exposé fait dans le cadre du Colloque organisé par l'EPHE (Melle Y. LEROY); avril 1977 - à paraître.
- h) Congrès International d'Acoustique 1977. Symposium satellite organisé par l'IRCAM. Exposé général d'introduction : Les outils de la psycho-acoustique: le 13 Juillet 1977 - A paraître.
- i) Guitare et Acoustique. Réunion du GAM du 11 Octobre 1977. Bulletin GAM N° 93 - A paraître (en cours d'édition).
- j) Métrologie et audition : précision et adéquation des méthodes utilisées en acoustique "auditive". Conférence GALF (1975) - Revue d'Acoustique, Vol.9 n° 36 (1976).
- k) La Machine à écouter : Essai de psycho-acoustique - 260 p., 76 fig., MASSON, PARIS (1977).
- 8°) MEYER (Jürgen)
- a) Akustik und Musikalische Aufführung Das MUSIKINSTRUMENT Frankfurt/Main (1972).
- b) La disposition des musiciens dans l'orchestre. Bulletin GAM N° 48 (1970).
- 9°) a) JANSSON (E.V.) et SUNDBERG (J) - Long-time-average-spectra applied to analysis of music. Part.1 Method and General applications. ACUSTICA, Vol.34, n° 1 (1975).
- b) SUNDBERG (J) and JANSSON (E) - Long-time-average-spectra applied to analysis of music. Part II. An analysis of organ stops. ACUSTICA. Vol.34, n° 5 (1976).
- c) JANSSON (E.V.) - Long-time-average-spectra applied to analysis of music. Part II. A simple method for surveyable analysis of complex sound sources by means of a reverberation chamber ACUSTICA, Vol. 34, n° 5 (1976).