

Alexandre  
GARCIA

LA DIRECTIONNALITE DES  
INSTRUMENTS  
DE MUSIQUE

N° 110

Juin 1983

G A M

BULLETIN DU GROUPE D'ACOUSTIQUE MUSICALE  
UNIVERSITÉ PARIS VI - TOUR 66 - PLACE JUSSIEU - PARIS 5<sup>e</sup>

LABORATOIRE D'ACOUSTIQUE  
UNIVERSITE PARIS VI  
Tour 66 - 5ème étage  
4 Place Jussieu - 75005 PARIS

113° Réunion du G.A.M.

LA DIRECTIONNALITE DES INSTRUMENTS DE MUSIQUE

par Alexandre GARCIA

Etaient présents

M. le Prof. SIESTRUNCK, Président  
Mlle CASTELLENGO, Secrétaire générale

puis par ordre d'arrivée :

M. EXPILLY (Assistant); M. VALETTE (Charg.Rech. CNRS); M. BOUTILLON et M. RADIER (stagiaires au lab.); MM. ERICHER (Inspecteur); J.D. POLLAK; Ch. BESNAINOU (CNRS); M. LEGUY (Facteur, Ing.); M. BOTTIN (Etud.); M. DUMIELLE (Prof.); M. BRIOT (Etud); M. D. MARCIER (Preneur de son); M. J.M. FONTAINE (Ing.); P. Ph. GATIGNOL (Prof.); M. J.F. AUGER (Ing. du son); M. J. KERGOMARD (Ch.Rech. CNRS); M. R. CAUSSE (IRCAM); M. A. DUPRE (Technicien son); M. Ph. MATHERAT (Chercheur Informaticien); M. THEOIN (Architecte); M. Ph. BOURGOIN (Dr. Médecine); M. V. BUCUR (chercheur); M. et Mme MULLETIN; M. S. CHAINTREUIL (Lab. ORSAY); M. D. FRIEDERICH (luthier); M. J.M. HEINRICH; M. P. PERIO (Prof. Paris XI); M. J. WRIGHT (musicien); M. D. DOUAU (Etud.).

Excusés : MM.

E. LEIPP; F. LALOE; Mme OTTIE; M. CEOEN; Mme FULIN; M. BAERD; M. DE MONTILLE;  
M. TONNERRE et M. BOURGEON; M. FERRON; M. LECOMTE, M. S.HUE; M. BRUNEAU; M. BUTY;  
M. E. CHUILON; M. HENRY; M. Paul FRANCOIS; M. ALLOUIS; M. RICHER; M. F. DROUIN;  
M. de MONTILLE.

---

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

N° Inscription à la Commission Paritaire : N° 819 ADEP

Impression : Laboratoire de Mécanique Physique, 2 Place de la Gare de Ceinture  
78210 - SAINT CYR L'ECOLE

Diffusion du bulletin G.A.M. - S'adresser à PSALTARELLE  
21 Rue de la Folie Méricourt  
75011 - PARIS - Tél. 807.80.64

ou au Laboratoire d'Acoustique (Voir entête)

P L A N

REMERCIEMENTS

INTRODUCTION

I. AVANT PROPOS :

1. Historique de la disposition des musiciens dans l'orchestre.
2. Repères sur le champ sonore, les microphones et la prise de son.

II. DONNEES ANALYTIQUES SUR LE RAYONNEMENT DES SOURCES :

1. Rayonnement par un tuyau ouvert
2. Rayonnement par deux sources
  - 2.1. Etude du champ externe
  - 2.2. Etude sur le champ interne
3. Rayonnement par tuyau percé de plusieurs trous
4. Sources étendues

III. APPROCHE GLOBALE DE LA DIRECTIONNALITE DES INSTRUMENTS DE MUSIQUE

1. Introduction
2. Les expériences de Jurgen MEYER, MARTIN, BERNHART, CAUSSE
3. Les expériences de JANSSON et les nôtres.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier M. J. SAPALY, Professeur de Mécanique, qui m'a accueilli au Laboratoire d'Acoustique de l'Université de PARIS VI,

M. C. THFOIN, architecte, avec qui les mesures et dépouillement ont été faits et tous ceux qui nous ont aidés :

- M. René CAUSSE de l'IRCAM où les enregistrements ont été faits, pour son soutien et son aide.
- M. de MONTILLE, M. VIALE, M. BOURGEON et M. TONNERRE du I.N.E. pour nous avoir prêté leur matériel d'analyse.
- M. E. LEIPP, Directeur de Recherche au CNRS, Mlle CASTELLENGO et M. J. KERGMARD chargés de recherche au CNRS, pour leur aide et pour les fructueuses discussions dont j'ai tiré beaucoup de profit.

Sans oublier, tous les amis musiciens qui ont très gentiment accepté de se prêter à l'expérience :

- M. Roland DAUGAREIL, violon solo à l'Opéra de Paris
  - M. Benny SLUCHIN, trombone à l'ensemble Intercontemporain
  - M. Laurence BEAUREGARD, flûtiste à l'ensemble Intercontemporain
- et mon cher collègue Jean-Christophe RADIER, guitariste et acousticien.

## INTRODUCTION

L'étude de la directionnalité des instruments de musique soulève énormément de problèmes : car au départ il faut faire le choix :

- soit d'adopter un point de vue métrologique et de faire des mesures précises et reproductibles en utilisant des excitateurs mécanique,

- soit d'adopter un point de vue global plus proche du preneur de son, en conservant les conditions normales de jeu (le musicien dans la réalité diffracte le son, bouge, ....)

Ce travail ayant été fait avec C. THOIN architecte et visant à être exploité pour la conception de salles de concert, nous avons choisi la seconde approche. Dès le début nous avons été confrontés au choix des microphones, de leurs emplacements, au choix des extraits musicaux, des méthodes de dépouillement,...

Aussi nous ne prétendons pas dans ce bulletin apporter des conclusions abouties mais plutôt de bien poser les problèmes, pour continuer et susciter la réflexion du lecteur.

Voyons le plan que nous avons adopté.

Lorsqu'un Chef d'orchestre dispose ses musiciens, l'un des critères de choix qu'il prend en compte est le rayonnement des instruments. Aussi il a semblé intéressant de présenter un historique de la disposition des musiciens dans l'orchestre.

Nous ferons quelques rappels sur le champ sonore, les microphones et la prise de son afin de mieux cerner les problèmes.

Ensuite nous verrons les résultats d'approches analytiques (modèles) essentiellement pour les instruments à vent. (Pour ce chapitre je suis largement redevable à Jean KERGOMARD pour ses explications et son aide).

Enfin nous aborderons des approches plus globales, dont celle que nous avons mise en oeuvre. On essaiera alors de tirer les enseignements des résultats des analyses, tout en ayant à l'esprit qu'il existe une difficulté, et non la moindre, à relier ce que l'on entend, aux résultats des différentes analyses.

## I - AVANT - PROPOS

### 1. HISTORIQUE DE LA DISPOSITION DES MUSICIENS DANS L'ORCHESTRE

Le style de musique et la nature du lieu dans lequel elle sera interprétée déterminent généralement les choix du chef quant à la disposition à donner aux musiciens de son orchestre. On peut remarquer d'ailleurs que son écoute sur son estrade est souvent différente de celle d'un auditeur dans la salle; pourtant, c'est son jugement qui sera déterminant à l'instant où il dosera les différentes "masses" sonores.

...../

- Le style de musique est déterminant car les compositeurs écrivent en ayant à l'esprit une certaine disposition d'orchestre; la partition impose souvent un choix logique : soit pour respecter des effets orchestraux soit tout simplement pour que des instrumentistes se voient ou s'entendent afin d'assurer la cohésion de l'ensemble. En musique contemporaine, la situation est encore plus nette : les compositeurs livrent le plus souvent avec la partition le plan pour placer les musiciens. Mais déjà Berlioz dans son traité d'orchestration demandait déjà aux compositeurs d'indiquer la disposition qu'ils jugeaient convenable.

" Le bon sens indique que le compositeur, à moins qu'il ne soit forcé de subir telle ou telle forme d'orchestre, doit combiner sa masse d'exécutants d'après le style, le caractère de l'oeuvre qu'il traite, et d'après la nature des effets principaux que le sujet peut amener. Ainsi dans un Requiem, et pour reproduire musicalement, les grandes images de la prose des morts, j'ai employé quatre petits orchestres d'instruments de cuivre placés à distance les uns des autres aux quatre angles du grand orchestre formé d'une masse importante d'instruments à cordes... Il est bien certain que les effets spéciaux obtenus par cette nouvelle forme d'orchestre étaient absolument impossibles avec toute autre.

C'est ici le lieu de faire remarquer l'importance des divers points de départ des sons. Certaines parties d'un orchestre sont destinées par le compositeur à s'interroger et à se répondre; or cette intention ne devient manifeste et belle que si les groupes entre lesquels le dialogue est établi sont suffisamment éloignés les uns des autres. Le compositeur doit donc dans sa partition, indiquer pour eux la disposition qu'il juge convenable". Berlioz Traité d'orchestration (p.293-4).

- D'autre part, le chef peut jouer de la salle : pour un même morceau, une disposition d'orchestre adéquate à tel lieu pourra ne pas convenir à tel autre. Ainsi Fürtwangler lors de ses tournées changeait la disposition de ses musiciens, l'adaptation aux salles visitées. Berlioz, dans son requiem, avait nettement défini une série de plans sonores distincts pour étager les orchestres en des points différents de la chapelle des Invalides.

Nous allons faire un survol historique afin de voir qu'elles ont été ces différentes dispositions au cours des siècles en essayant d'en dégager les raisons. Pour ce qui suit, je me suis référé à divers auteurs cités en bibliographie.

Dans l'orchestre baroque, le clavecin qui avait un rôle conducteur (continu) était placé au centre; ce type même de musique est "assise" sur une importante partie de basse et les violoncelles et contrebasses étaient dispersées comme le dit J.J. Rousseau dans son dictionnaire de Musique de 1754 : "parce que c'est la basse qui doit régler et soutenir toutes les autres parties et que tous les musiciens doivent l'entendre également".

Ainsi lorsque la partie de basse continue disparaîtra, la disposition se modifiera.

Les musiciens jouaient debout, face à la scène dans les opéras et face au public pour les concerts. Les premiers concerts publics datent de la fin du XVII<sup>e</sup> en Italie et du XVIII<sup>e</sup> en France. Les salles de châteaux peu meublées étaient très réverbérantes. Par contre, les églises l'étaient moins qu'aujourd'hui de par la présence de tenture et de tapisseries sur les murs.

Voici (fig.1 et 2) deux dispositions d'orchestres typiques d'après J.J. Quantz très précisément décrite dans son ouvrage. Essai d'une méthode pour apprendre à jouer de la Flûte Traversière avec plusieurs remarques pour

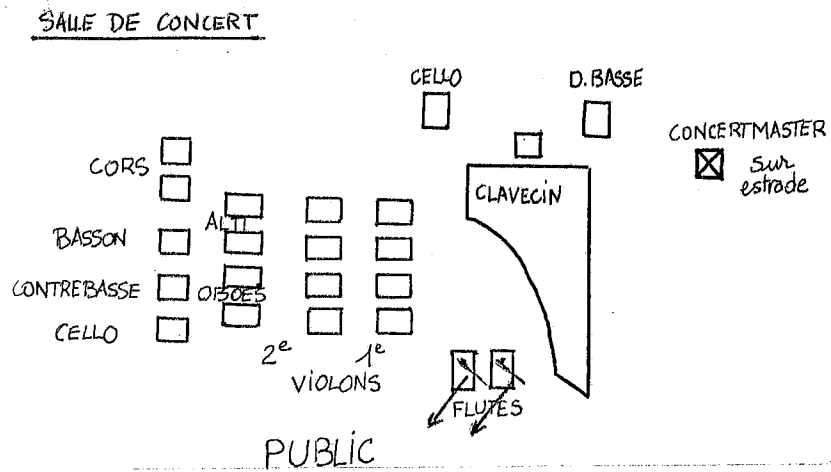


figure 1

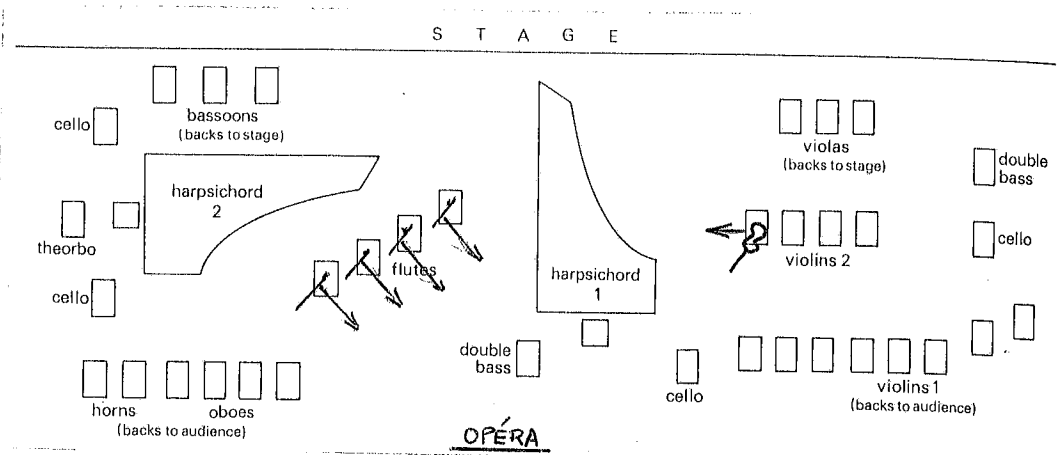
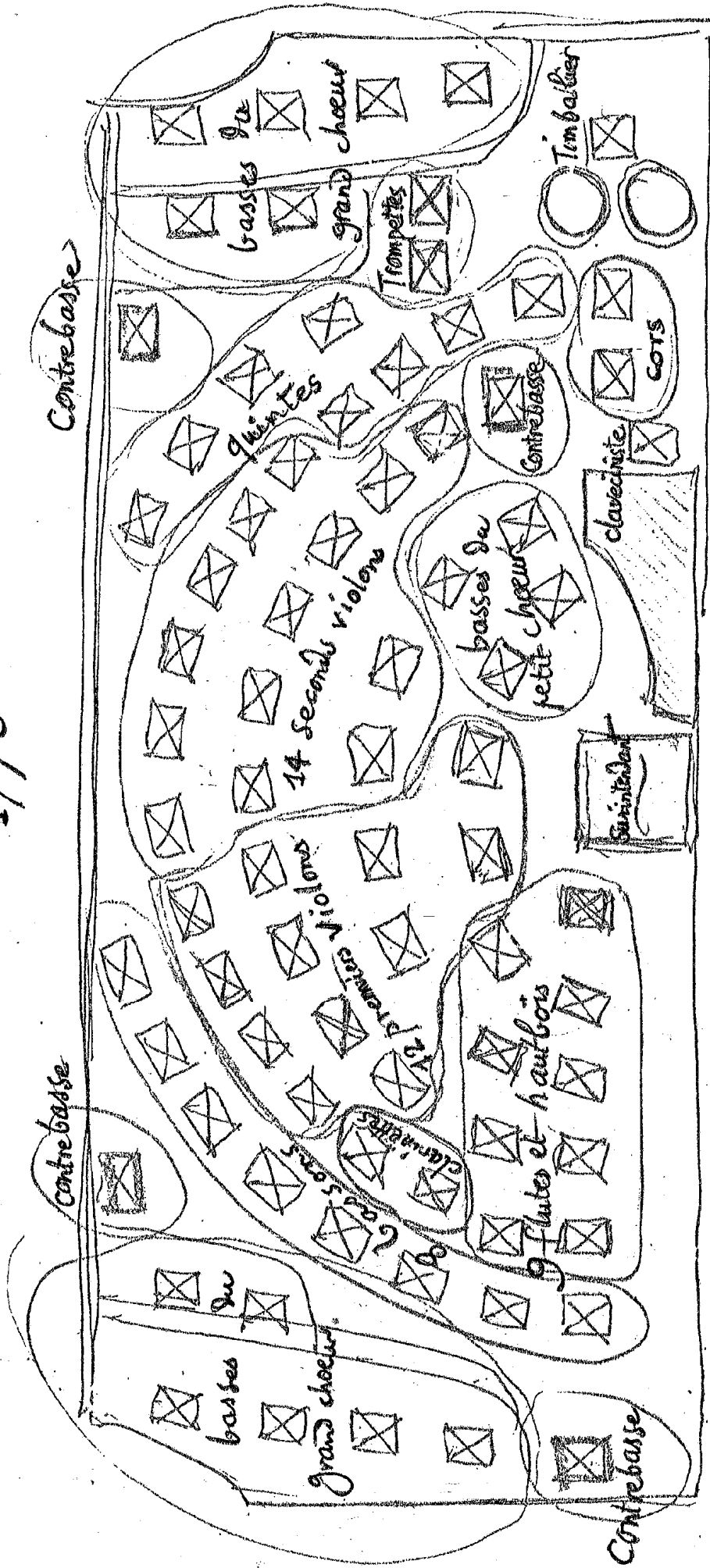


figure 2

Orchestre de la salle de Spectacle du Roi

1770



- Surintendant —
- 26 violon , 8 altos , 16 Violoncelles , 4 contrebasse ,
  - 9 flutes et hautbois, 2 Clarinettes 8 Bassons
  - 2 Trompettes, 2 COTS, Tomballes -
  - 1 Clavecin

Figure 3



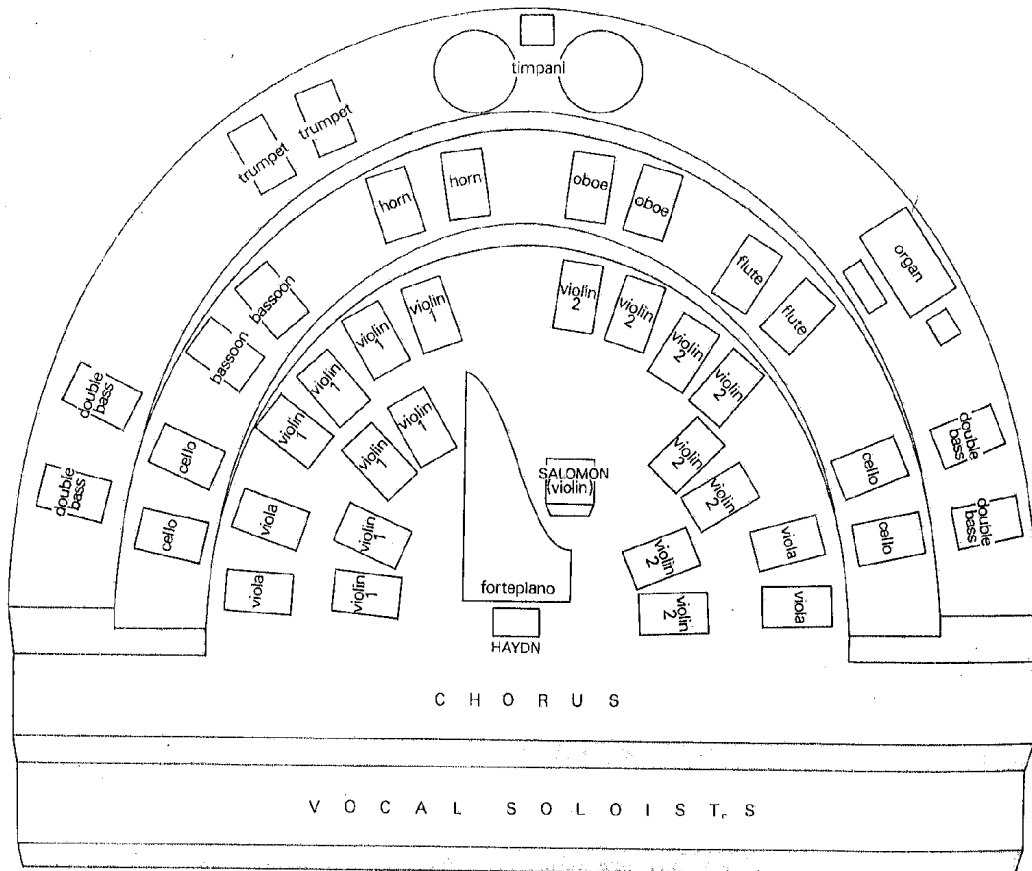
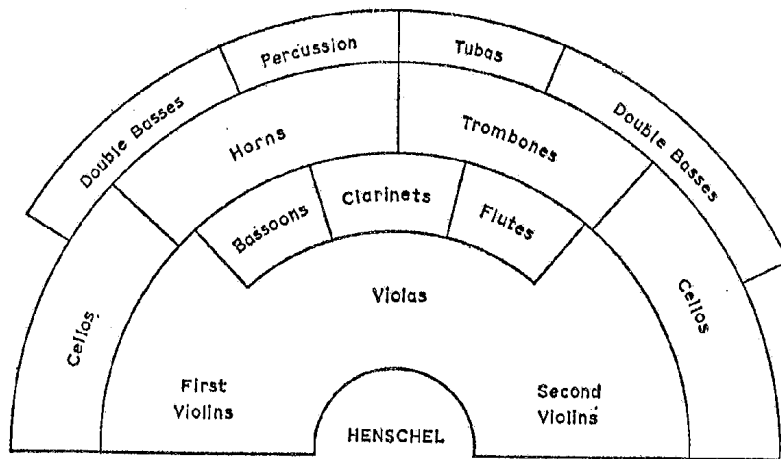


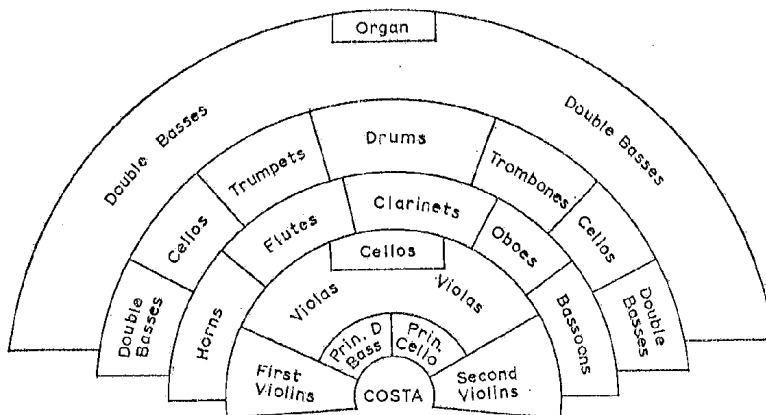
figure 4

figure 5



Boston Symphony Orchestra, 1881

figure 6



Philharmonic Society, 1846

servir au bon goût dans la musique ....

(1752) "Il est d'autant plus nécessaire d'y être fort attentif, que le bon succès d'une Musique ne dépend pas moins de la proportion suivant laquelle ceux qui jouent sont distribués et arrangés, que de la bonne exécution même".

Dans l'orchestre d'opéra, la section de basses du centre (clavecin, violoncelle et contre-basse) accompagnait les récitatifs et se joignait au reste des instrumentistes pour les tutti (figure 2).

La basse continue se maintiendra jusqu'à la moitié du XVIII<sup>e</sup> Siècle (voir figure 3 - Orchestre de la salle de spectacle du Roi 1770). La première apparition de la disposition en arc de cercle est estimée à 1777 en l'église de Mannheim sous la direction de l'Abbé Vogler. Le schéma suivant montre la disposition en amphithéâtre introduite par J. Haydn pour ses concerts londoniens sous la direction du concertmeister Salomon (1791-93) (figure 4).

Les premiers et seconds violons se font face. Les pupitres de violoncelles et contrebasses scindés en deux les encadrent. Cette disposition se maintiendra tout au long du 19<sup>e</sup> Siècle comme nous le montrent les dispositions du Boston Symphony Orchestra de 1881 et du Philharmonic Society (ancêtre du Royal Philharmonic Orchestra) de 1846 (fig. 5 et 6).

Dans ce dernier cas, les parties de violoncelles et contrebasses sont encore plus dispersées, une partie de celles-ci s'intégrant aux violons-altos pour former le quatuor.

Dans la disposition du Gewandhaus de Leipzig (fig. 7) de 1834 sous la direction de Mendelsohn, ce sont les altos qui sont rejetés sur la droite derrière les seconds violons tandis que les pupitres de violoncelles contre-basses occupent le centre de l'orchestre. Hélas, il est difficile pour ces derniers cas de connaître les motivations des chefs.

La taille des orchestres grandissant au 19<sup>e</sup> Siècle, il fallut adapter les dimensions en particulier des fosses d'opéra.

Le cas de Wagner à Bayreuth est tout à fait intéressant puisque toute la réalisation du théâtre fut sous ses directives : c'est un cas unique d'adéquation d'un lieu à une conception musicale et scénique.

Il réalisa ainsi l'idée que dès 1797 Gréty avait émise en faisant construire une fosse profonde et invisible, l'auditoire pouvant se concentrer totalement sur l'action.

Les instrumentistes sont disposés sur une série de gradins, comme le conseillait Berlioz dans son traité d'orchestration (p.294), les cordes devant et les vents derrière en contrebass. Les premiers violons sont placés à droite afin de respecter la balance puisque leur son est projeté sur scène par l'intermédiaire d'un écran convexe.

Les chanteurs disent qu'ils sont littéralement portés par la musique; celle-ci se mêlant à leurs chants.

Avant la dernière guerre, les chefs disposaient les cordes selon la disposition dite allemande ou "européenne" héritée directement de celles qui précèdent puisque le centre est laissé aux instruments les plus graves du quatuor : altos et violoncelles, augmenté des contrebasses (fig. 9)

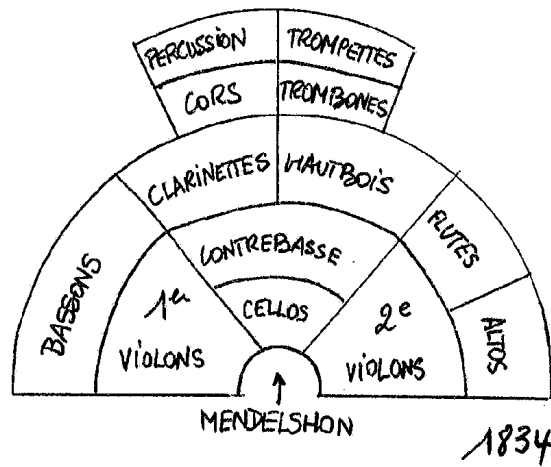


Figure 7

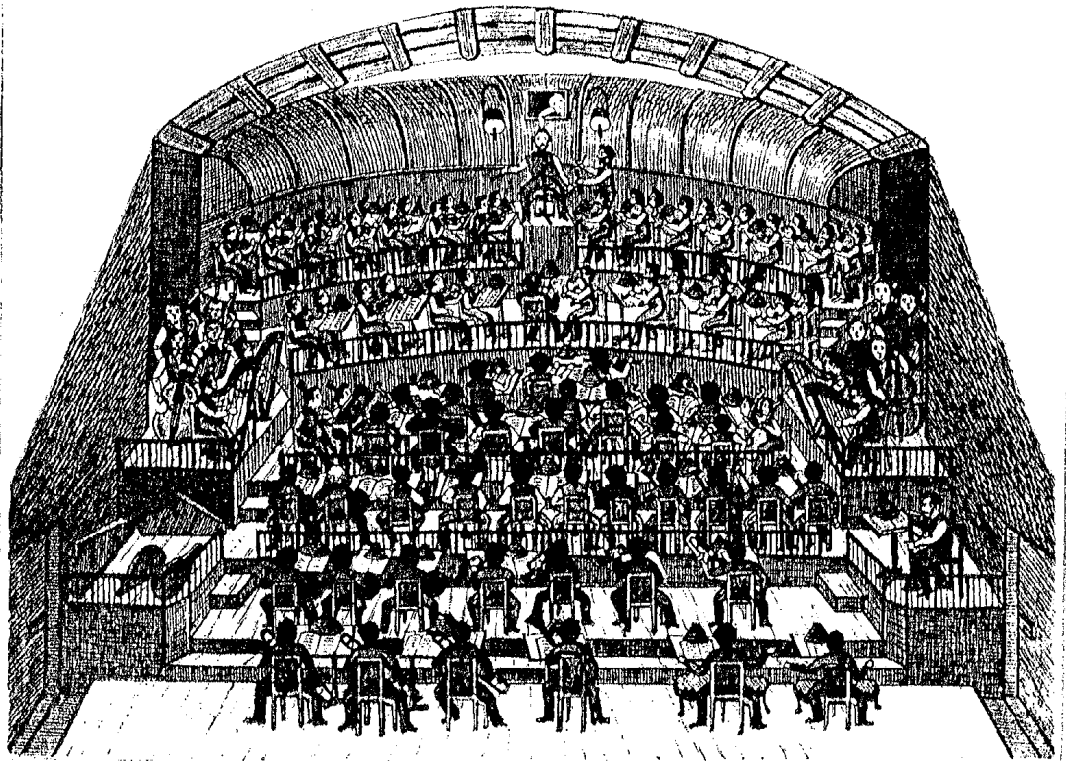


Figure 8

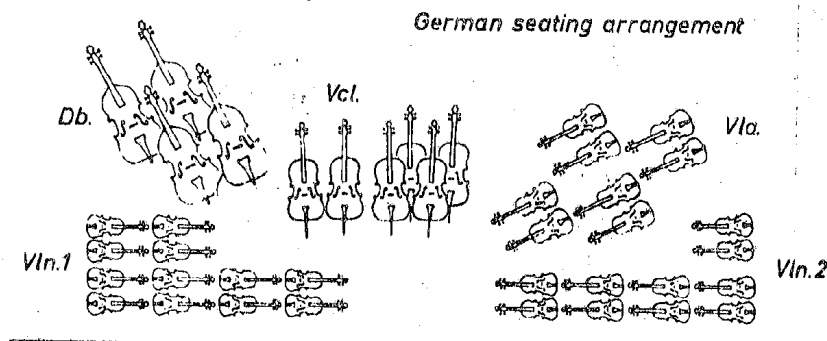


Figure 9

368 4<sup>e</sup> mouvement de la 10<sup>3</sup>e Symphonie de J. HAYDN

293 4<sup>e</sup> mouvement de la 4<sup>e</sup> Symphonie de BEETHOVEN

figure 10

*largamente*

figure 11

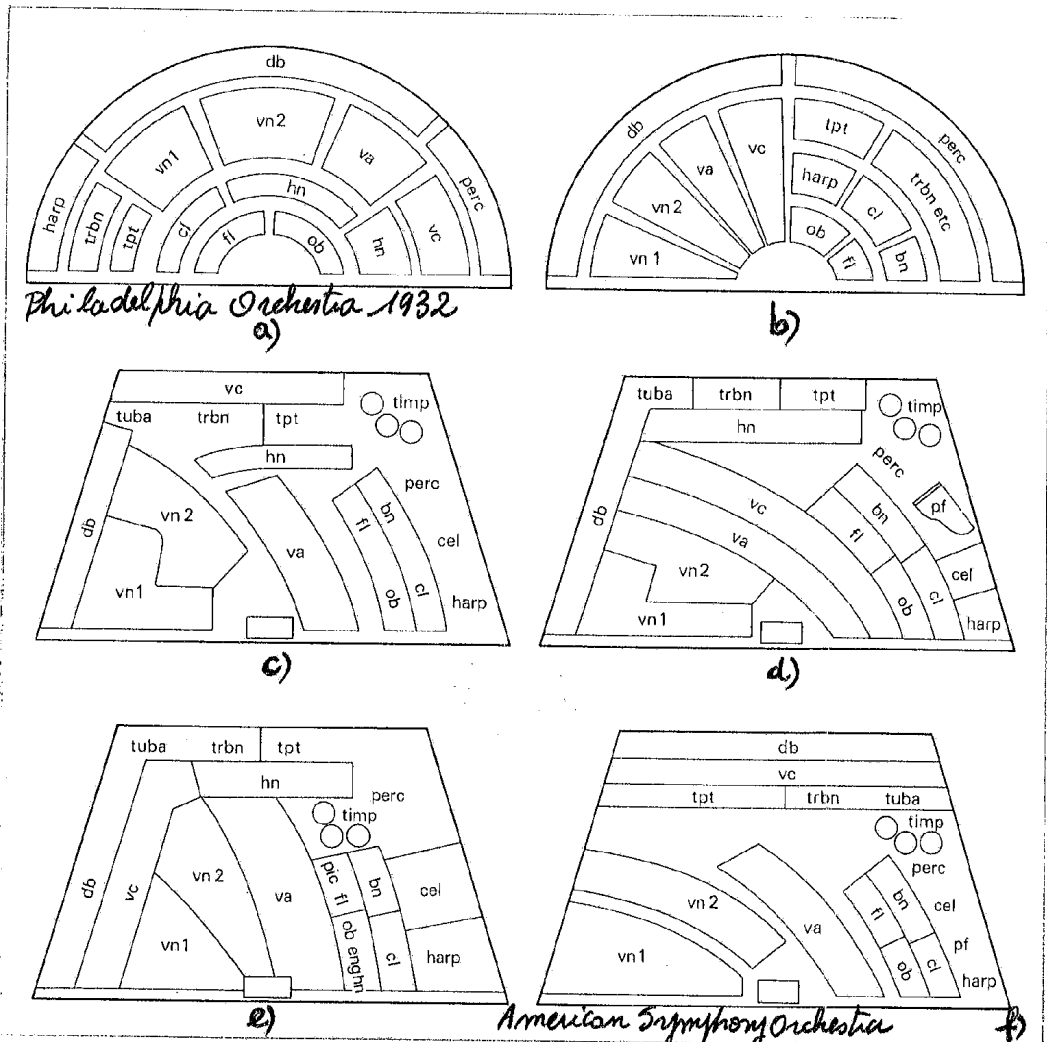


figure 12

Les avantages de cette disposition sont :

- un très bon contact entre le chef et les violoncelles
- un excellent rapprochement des violoncelles et contrebasses pour les entrées critiques de ces instruments (mesure 211 du final 4<sup>e</sup> Symphonie de Schumann)
- un effet "stéréo" des sections de 1<sup>e</sup> et 2<sup>e</sup> violons, indispensable dans les passages de dialogues entre eux comme par exemple le 4<sup>e</sup> mouvement de la 103<sup>e</sup> Symphonie de J. HAYDN ou le 4<sup>e</sup> mouvement de la 4<sup>e</sup> Symphonie de BEETHOVEN (fig. 10).
- une homogénéité lorsque les violons et violoncelles jouent à l'unisson comme dans les mesures 185 et suivantes du 4<sup>e</sup> mouvement de la 1<sup>ère</sup> Symphonie de BRAHMS (fig.11).

On peut l'entendre dans l'enregistrement de Klemperer avec le Philharmonic Orchestra.

STOKOWSKY semble avoir été toute sa vie intéressé par ces problèmes comme nous le montrent les dispositions peu orthodoxes du Philadelphia Orchestra et de l'American Symphony Orchestra, allant jusqu'à placer les vents devant les cordes ou à scinder radicalement ces deux groupes : les vents à droite, les autres à gauche de la scène (fig. 12a).

La disposition de l'American Symphony orchestra de 1971-72 présentée était utilisée à Carnegie Hall (fig. 12 f).

Malheureusement, nous n'avons pu trouver de documents rapportant les motivations de ses dispositions.

Enfin, la disposition qu'il introduisit en 1945 et qui semble de plus en plus adoptée est celle communément appelée "américaine" bien que des chefs comme Beecham, Woods ... la pratiquaient en Angleterre avant guerre.

Ici les cordes sont placées comme dans le quatuor à cordes traditionnel mais tandis que dans un quatuor les voix sont bien individualisées (fig.13), au sein de l'orchestre le nombre d'instrumentistes comme toutes singularités, ceci est peut être explicable par les techniques modernes d'enregistrement.

Si cette disposition offre un bon contact entre 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> violons dans les passages virtuoses, elle a le désavantage de séparer les aigus et les graves.

Une variante introduite par Fürtwangler échange les places des altos et des violoncelles, mais dans cette configuration l'accompagnement des 2<sup>e</sup> violons et des altos peut couvrir le chant des 1<sup>er</sup> violons, le chef devant alors compenser cela par des dosages subtils (fig.14).

Si cette disposition américaine est de plus en plus adoptée, il reste des chefs et non des moindres pour être attachés à l'ancienne. Ainsi Karajan à Berlin, Kubelik au Bayerischen Rundfunk et c'est celle généralement adoptée à l'Opéra de Paris. On trouvera dans le texte qui suit les raisons de Sir Adrian Boult dans son "Handbook on the Technique of conducting".

"The problem of scating is often left to the conductor, and so a few words about it may be useful. A great deal depends on the shape of the platform, and anything that is said about the general plan is of course subject to considerable adaptation.

American seating arrangement

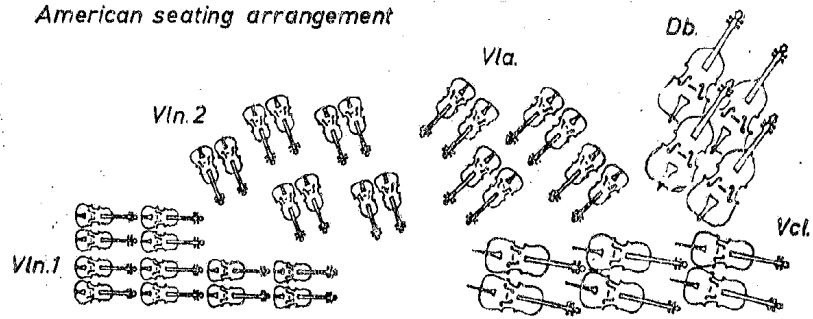


figure 13

variation of the American arrangement  
(Füchtwangler.)

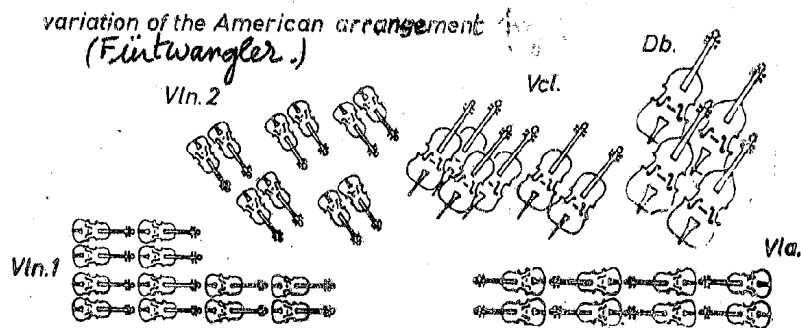


figure 14

A musical score for a Trio section, labeled "TRIO 1." and "p". The score is written for four staves: Flute (Fl.), Violin (Vln.), Viola (Vla.), and Violoncello/Double Bass (Vcl. & CB.). The music is in 3/4 time and features a melodic line in the flute and violin, with the viola and cello providing harmonic support.

figure 15

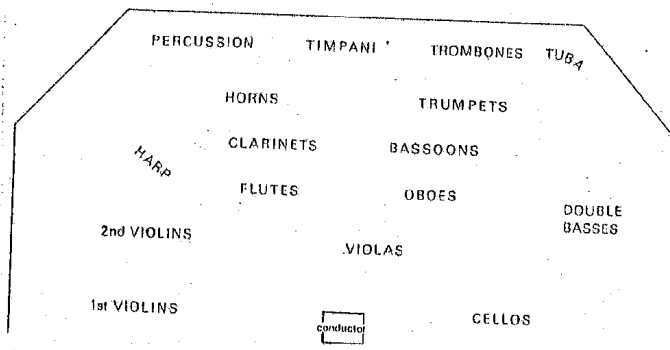


figure 16

"It has become the practice that the principal section of an orchestra (the first violins) or a choir (first sopranos) should be on the conductor's left. The rest of a choir should be ranged round the back wall of the room in the forme S : T : B : A, because with the usual preponderance of ladies it is generally wise to let a few of the leading men occupy the front rows in the centre. Formerly, with choirs that were strong in men it was often the rule to let ladies occupy the front rows, with tenors behind the sopranos and basses behind the altos.

With the orchestra it is a good deal more complicated, and it has, sadly, now become the practice to let the strings radiate round the conductor in the order of firsts, second violins on the firsts' left, violas next more or less in the middle, and cellos on the right, with basses behind them. I would advise even the least inexperienced forces against this practice. It is a little easier for the performers in some ways perhaps, but surely the principal thing is that the audience should get a balanced aural picture (visual also if that matters), and so I always place the second violins on my right, so that they balance the firsts, and in the same way I like to have my cellos towards the middle of the stage, and the basses also in the middle but further back of course; perhaps even behind the woodwind who are usually grouped in the middle behind the strings, with brass divided each side of the woodwind group. In a small hall it is of the quite good if the brass sit sideways so that their tone can blow across the room rather than straight down to the audience".

Les bois et les cuivres sont généralement sur deux rangs derrière les cordes : flûtes et hautbois devant clarinettes et bassons, le soliste de chaque pupitre placé au milieu du groupe pour assurer un meilleur contact.

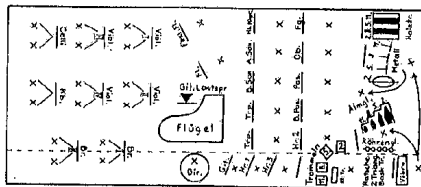
Les flûtes sont placées à gauche du chef, les hautbois à droite, tandis que l'arrangement clarinettes bassons peut varier. Ainsi pour produire "l'unisson viennois" à l'octave, le contact doit être bon entre bassons et violons comme dans cet extrait d'une symphonie de J. HAYDN (fig. 15).

Les cors sont placés à gauche ou à droite, la condition principale étant qu'ils ne doivent pas empêcher d'autres instrumentistes de s'entendre tels les trombones, tout en assurant un bon contact avec les violoncelles car souvent ils jouent à l'unisson (comme dans la fin du mouvement lent de la 1ère Symphonie de BRAHMS).

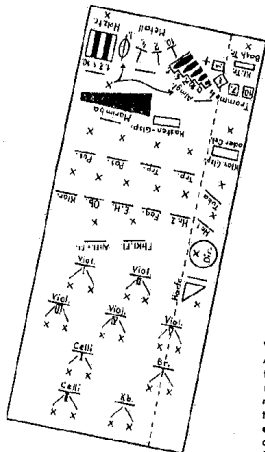
Les trompettes-trombones-tuba sont au second rang, les timbales au milieu pour la symétrie.

Les percussions sont au fond mais leur position peut varier, ainsi dans le boléro de Ravel la caisse claire est placée au centre pour des raisons de précisions rythmiques puisqu'elle imprime toute sa pulsation au morceau. Nous citerons encore BERLIOZ : "Pour les tambours, grosses caisses, cymbales et timbales, par exemple, s'ils sont employés à frapper certains rythmes tous à la fin d'après le procédé vulgaire, ils peuvent rester réunis; mais s'ils exécutent un rythme dialogué, dont un fragment est frappé par les grosses caisses et cymbales, et l'autre par les timbales et tambours, sans aucun doute l'effet deviendra incomparablement meilleur, plus intéressant, plus beau, en plaçant les deux masses d'instruments à percussion aux deux extrémités de l'orchestre, et conséquemment à une assez grande distance l'une de l'autre".

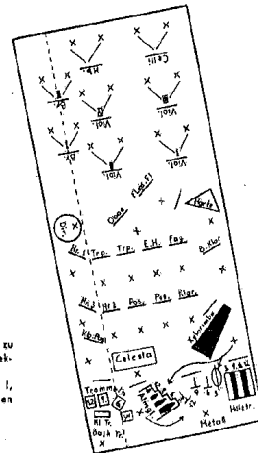
Orchester II (Mitte) 36 Spieler



Orchester I (links) 37 Spieler



Orchester III (rechts) 36 Spieler



Weg für Vibraspieler zu Almglocken, Tamtom und Becken frei lassen.

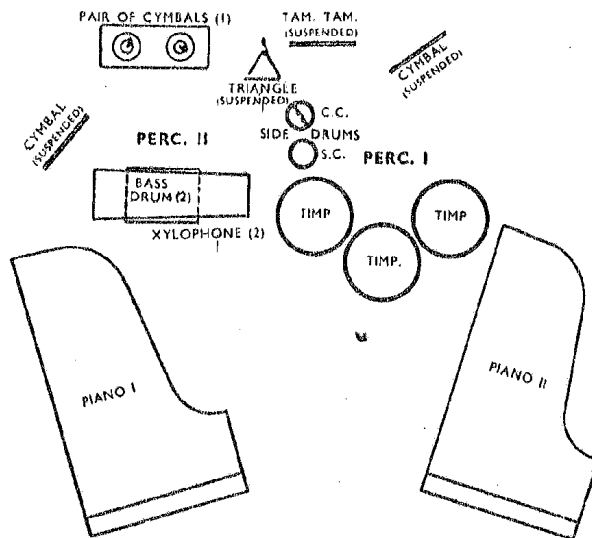
Sitzordnung — im Gegensatz zur beigefügten Fotografie — etwas geändert.

Weg für Marimbaspielder zu Almglocken, Becken und Tomtom frei lassen (Almglocken so schräg stellen, daß der Marimbaspielder den Dirigenten sehen kann, wenn er mit einem zweiten Schlagzeuger die Almglocken von beiden Seiten gleichzeitig schlägt). Harfe kann auch, wie in O II, am vordere Rand des Podiums stehen

Weg für Marimbaspielder zu Almglocken, Tamtom und Becken frei lassen. Harfe kann auch, wie in O I, links neben dem Dirigenten stehen.

— = Pull  
x = Sitz oder Stand

GRUPPEN (STOCKAUSEN)



- (1) The pair of Cymbals should be laid on cloth, when not in use, to prevent vibration.
- (2) The Xylophone should be placed above or next to the Bass Drum.

NOTES.

The Bass Drum is to be played with a double-headed stick.

The Triangle is to be played (a) with the usual metal beater; (b) with a thin wooden stick; (c) with a short, but rather heavy, metal beater; each according to the indications in the score.

The Cymbal is to be played (a) with an ordinary timpani stick; (b) with the heavy end of a side drum stick (marked in the score "col legno" or "c.l.")—here the Cymbal should be struck either on the edge or, if indicated, on the dome in the centre; (c) with a thin wooden stick; (d) with the blade of a pocket-knife or some similar instrument. The sign "a2" indicates that two Cymbals should be clashed.

The Side Drums, either with or without snares, are to be played with the usual sticks. If, however, the Side Drum with snares should sound too loud, thinner sticks may be used especially in mezzoforte, piano and pianissimo passages (the same as those mentioned above in (c) for the cymbal). The snares of the Side Drum should be released when the instrument is not in use, to prevent vibration.

Experience has proved that two skilled players are sufficient for the whole percussion part. Should this in some cases prove difficult, a third player may be employed for the Xylophone, which in this case should be placed either behind or in front of the other percussion instruments.

figure 17

SONATE POUR  
2 PIANOS &  
PERCUSSIONS  
(BARTÓK)



Béla Bartók indique dans la partition de sa sonate pour deux pianos et percussion (1942) la disposition à donner aux différents instruments à percussion (à noter que Berlioz considère déjà dans son traité d'orchestration le piano comme un instrument à percussion).

Plus récemment enfin, une préoccupation d'un grand nombre de compositeurs contemporains est de "spatialiser le son", de lui donner à la fois une direction et un sens. On peut s'en rendre compte dans le texte de Stockausen suivant :

"De la musique qui marche, qui court.

Voilà ce qui se passe actuellement dans une salle de concert : nous avons été tellement habitués à ce qu'il n'y ait pas de mouvement qu'on pourrait remplacer un musicien par un haut-parleur et par un mannequin, et les gens n'y verraient que du feu. C'est une situation qui a une certaine signification spirituelle, mais en tout état de cause, à partir du moment où l'intuition n'est pas là, et si les musiciens ne font que suivre une battue, il n'y a pas de raison de ne pas mettre des mannequins à leur place.

On avait même pensé mettre les musiciens sur des chaises à bascule pour faire bouger le son. Mais cela devenait trop compliqué. A Darmstadt, dans les années cinquante, j'ai dirigé un séminaire pendant lequel nous avons fait de la musique qui marchait, qui courait. Il y avait des instrumentistes et des chanteurs qui entraient ou sortaient de la pièce où nous étions, tout en faisant de la musique. Les musiques qui avaient été composées n'admettaient l'immobilité d'un son ou d'un musicien que dans des situations très précises. Auquel cas, c'était le public, divisé en petits groupes, qui se déplaçait pour varier les perspectives d'écoute.

La production sonore, vue sous son aspect physique, est en mutation constante. Déjà dans *Zeitmasse*, j'avais placé de petites flèches au-dessus de certaines notes dans la partition, pour indiquer aux joueurs de cor anglais, de hautbois ou de clarinette qu'ils devaient tout d'un coup diriger leur instrument vers le ciel, jouer leur note, et se remettre ensuite dans la position normale. Comme font les oies, qui lèvent la tête pour pousser leur cri. J'ai toujours réfléchi à la place des instruments : je ne voulais pas préciser la disposition, différente à chaque fois. D'ailleurs il serait bon de faire la même chose pour la musique classique. Il y a des cas où une disposition orchestrale différente pourrait rendre la musique plus transparente. Tout cela nous amène à penser que les mouvements du corps sont un aspect important et spécifique de la cérémonie sonore. Les Indiens croisent les jambes, les Japonais s'assoient sur leurs talons lorsqu'ils jouent de la musique.

(Extrait des entretiens avec Jonathan Cott).

Pour *Carré* joué aux Proms le 07 Juillet 1972, 4 orchestres étaient disposés en rayon sur le parterre circulaire au centre du Royal Albert Hall.

P. Boulez avait des préoccupations similaires pour son *Répons* de 1981 donné au Théâtre de Bobigny : un orchestre de chambre était placé au centre de la salle; les consoles des ordinateurs pour traiter le son en temps réel des six solistes dispersés aux quatre coins de la salle étaient situées derrière le chef tandis que le public se plaçait autour de l'orchestre, voyant les musiciens de côté ou de derrière. Entre deux exécutions de la même oeuvre, les spectateurs étaient invités à changer de place afin d'appréhender une autre "perspective" sonore.

PIERRE BOULEZ : REPONS , oeuvre conçue et réalisée à l'IRCAM (1980-81) en fonction des possibilités techniques offertes par la machine 4 X, nouveau type d'ordinateur musical inventé par Giuseppe di Giugno et l'équipe de l'IRCAM. La forme de cette oeuvre résulte des relations entre trois sources fondamentales. Un orchestre de chambre de vingt-quatre exécutants (formation classique) est entouré de six solistes jouant un instrument de base et d'autres complémentaires, mais dont les spectres sonores accusent un certain degré de convergence. Les solistes ont à leur disposition des magnétophones qu'ils déclenchent à des moments prévus mais variables. Les séquences diffusées à partir de ces magnétophones sont des fonds sonores différemment programmés, mais dont le but est apparemment de densifier l'information de l'auditeur. Boulez en parle comme de "tapisseries" mais dont les panneaux sont mobiles, puisque les exécutants se transmettent la musique l'un à l'autre comme s'ils disposaient (c'est encore une image de Boulez) de "balles de tennis". Les six solistes sont également reliés à la machine 4 X dont le rôle est de transformer les sons émis, mais dans des conditions bien déterminées, entendons que la programmation de l'appareil est déclenchée pendant l'exécution selon les impulsions transmises par l'interprète à partir de hauteurs et d'intensités déterminées produites par l'instrument. C'est à partir d'une telle procédure que Boulez peut parler légitimement de "transformations intelligentes du son" : la transformation est en effet ainsi intégrée dans le processus de la composition.

Célestin DELIEGE (extrait du programme réalisé par l'Avant-Scène Opéra pour le Festival d'Automne à Paris).

On prend conscience, après cette présentation, que ce problème de disposition est complexe puisque mêlant des critères acoustiques, musicaux et de choix esthétique de la part du chef. D'autre part, les raisons de ces choix sont rarement exprimées dans la littérature que nous avons pu consulter : tout semble ici question de métier et de jugement, propre à chaque situation.

L'étude de la directionnalité des instruments permettra peut-être de mieux cerner le problème et de justifier certains choix.

## 2. QUELQUES REPÈRES SUR LE CHAMP SONORE, LES MICROPHONES ET SUR LA PRISE DE SON

2.1. Il y a phénomène acoustique lorsqu'un milieu est le siège de perturbations dynamiques qui modifient à tout instant et en tout point la pression, la masse volumique, la vitesse des particules.

Les lois de l'acoustique relient ces quantités entre elles. A partir de ces lois on peut par exemple, déterminer le champ de pression connaissant la nature du milieu et de l'excitation et en déduire le champ de vitesse. Ces deux quantités sont les principales qui caractérisent le champ acoustique. Il faut souligner que ces deux champs sont de nature très différente; prenons le champ d'ondes sphériques. Il est produit par une sphère pulsante émettant des ondes concentriques qui se propagent dans toutes les directions et dont l'énergie se dilue d'autant plus vite que le carré de la distance au centre est grande.

- le champ de pression d'ondes sphériques est un champ scalaire qui varie en  $\frac{1}{r}$  où  $r$  représente le rayon à la source, tandis que
- le champ de vitesse, champ vectoriel, est la somme de deux termes : l'un variant en  $\frac{1}{r^2}$  et prépondérant en champ proche ( $r \ll \lambda$  longueur d'onde) l'autre variant en  $\frac{1}{r}$  et prépondérant en champ lointain.

Ainsi près d'une source d'ondes sphériques, l'énergie cinétique est supérieure à l'énergie potentielle, loin de la source elles sont comparables.

Aussi faut-il faire attention à ce que l'on capte lorsque l'on utilise des microphones.

Les principaux types de microphones sont :

- les microphones à pression et
- les microphones à gradient de pression (dont le microphone à vitesse)

La membrane des microphones à pression est en contact avec le champ à capter par une seule de ses faces tandis que la membrane des microphones à gradient de pression est en contact avec le champ à capter par ses deux faces : la face arrière et la face avant (voir figure 18).

Les ondes parviennent à la face arrière à travers des ouvertures faites dans le carter du microphone.

Tous les microphones mesurant des gradients de pression sont directionnels, en effet ils captent la différence de pression en deux points proches de l'espace, cette différence orientée définit un vecteur donc une direction. Ces microphones favorisent donc le champ sonore dans certaines directions.

La tension délivrée à la sortie du micro s'écrit :

$$e = R_1 + R_2 \cos \theta$$

( $R_1$  et  $R_2$  sont des constantes propres aux différents types de microphones et  $\theta$  est l'angle d'incidence de l'onde progressive arrivant sur le micro). Ceci pour des longueurs d'ondes supposées grandes devant les dimensions du microphone et pour un champ d'ondes progressives.

Voici les cas que l'on rencontre suivant les différentes valeurs de  $R_1$  et  $R_2$  correspondantes aux divers types de microphones (cf. figure 19).

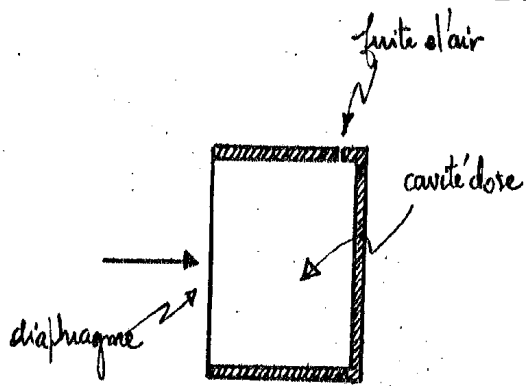
Ainsi le microphone mesurant la vitesse est le microphone bidirectionnel (A); les microphones cardioïde (C) et hypercardioïde (B avec  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{3}$ ) mesurent des combinaisons de pression et de gradient de pression; techniquement cela est réalisé en introduisant une différence d'amplitude et de phase entre l'onde avant et l'onde arrière par des circuits acoustiques appropriés (cf. figure 18).

Les microphones à pression sont omnidirectionnels (E) : ils captent le même signal quelle que soit leur orientation par rapport à la source.

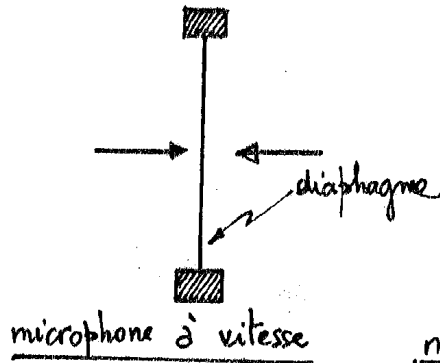
Voici par exemple la notice technique donnant la directivité du micro U.89-i de Neumann (échelle logarithmique, c'est-à-dire échelle en dB (cf. fig.20))

Lorsque la longueur d'onde deviendra de l'ordre de grandeur des dimensions du microphone, celui-ci perturbera le champ acoustique à mesurer - aussi faudra-t-il faire des corrections de directivité prenant en compte la diffraction due au microphone.

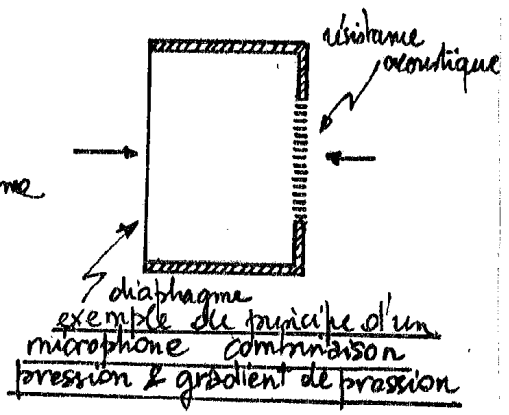
...../



microphone à pression



microphone à vitesse



exemple de principe d'un microphone combinaison pression & gradient de pression

figure 18

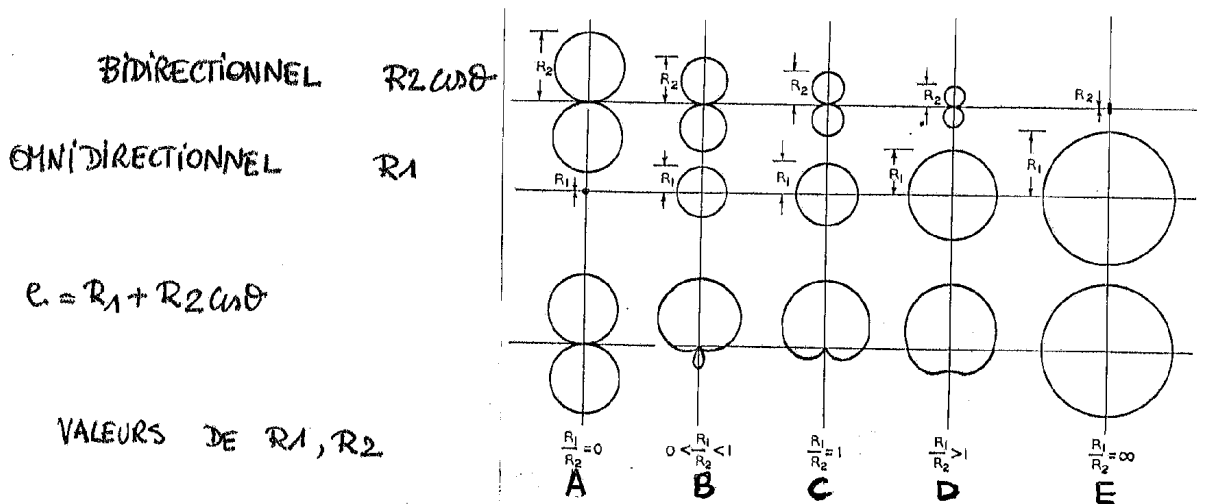
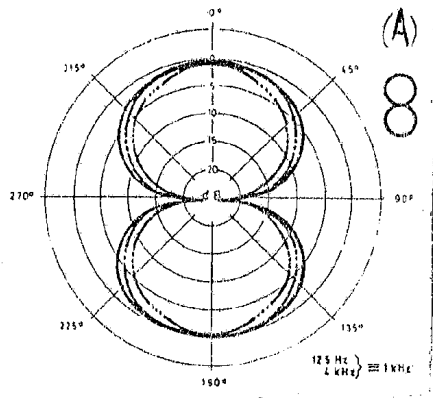


figure 19



DIRECTIVITÉ DU  
MICROPHONE U.89 i  
NEUMANN

----- 125 Hz  
----- 1 kHz  
----- 4 kHz  
----- 9 kHz  
----- 12,5 kHz

(EXPÉRIMENTAL - ÉCHELLE LOGARITHMIQUE)

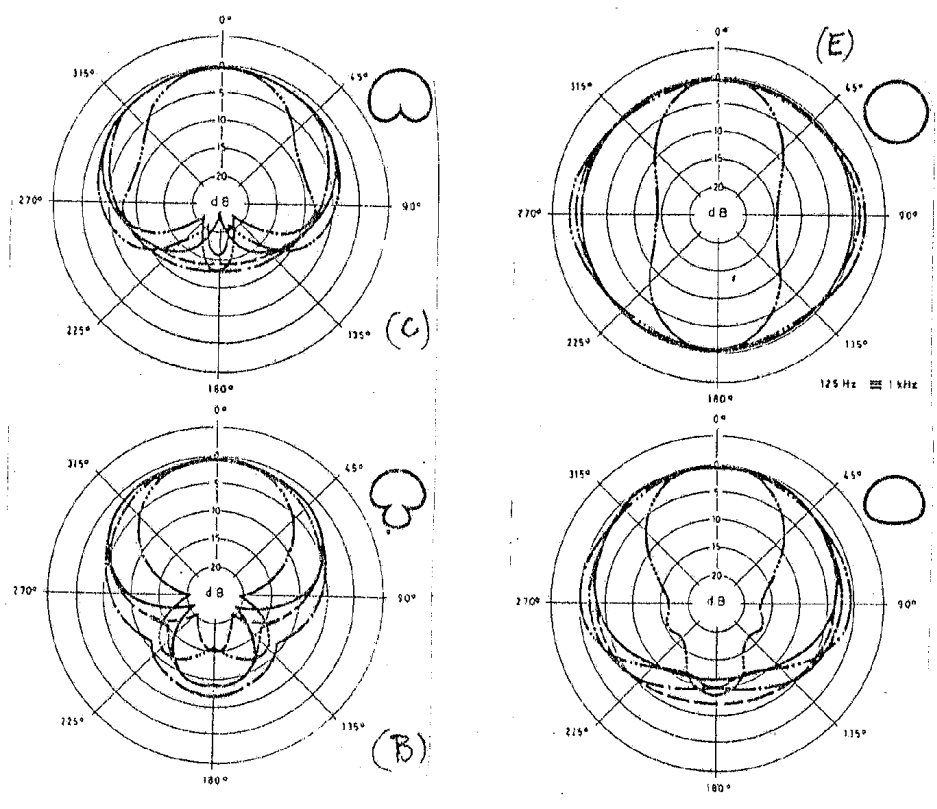
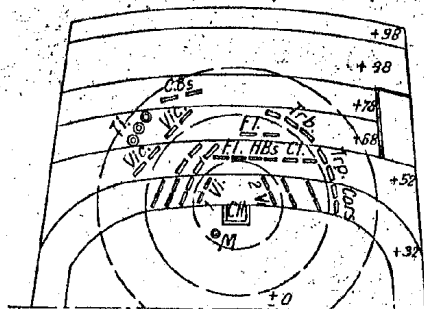


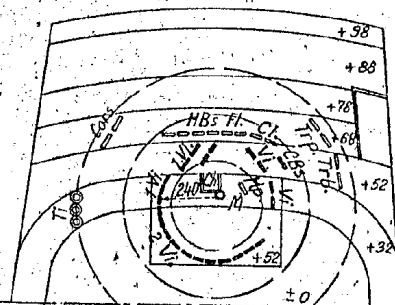
figure 20

EXEMPLES DE PRISE DE SON D'UN ORCHESTRE SYMPHONIQUE  
 (Essais réalisés dans les studios de Beromünster (Suisse)  
 sous la direction du D<sup>r</sup> H. SCHERCHEN)

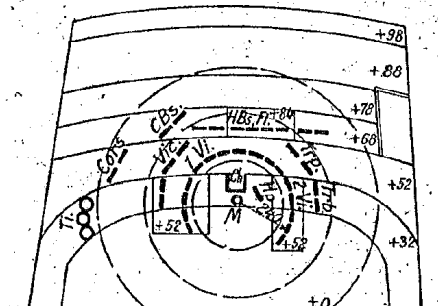
Exemple I



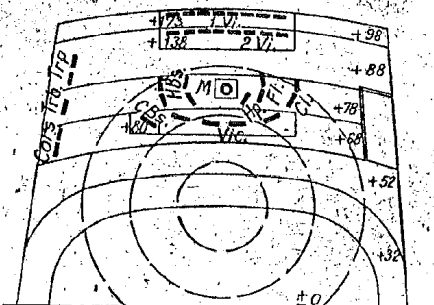
Exemple II



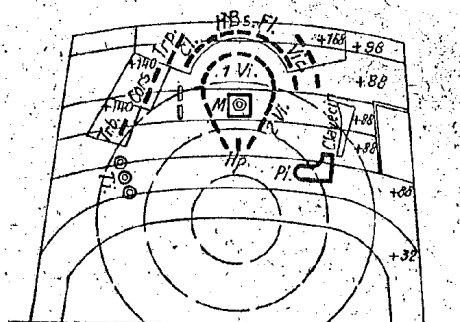
Exemple III



Exemple IV



Exemple V



Ch. - Chef.  
 C.Bs. - Contrebasse.  
 Cl. - Clarinette.  
 Fl. - Flûte.  
 H.Bs. - Hautbois.  
 Hp. - Harpe.  
 M. - Micro.  
 Pi. - Piano.  
 Ti. - Timbales.  
 Trb. - Trombone.  
 Trp. - Trompette.  
 Vi. - Violon.  
 Vic. - Violoncelle.

figure 21

Il faut insister sur le fait que ces diagrammes sont valables pour des microphones placés en champ d'ondes progressives, par exemple sphérique ou plane; par contre dans un champ d'interférences la réponse du microphone lorsqu'il tourne sur lui-même peut être très différente.

On voit qu'il faut faire attention à ce que l'on capte en employant tel ou tel microphone. Pour capter la pression on prendra un microphone omnidirectionnel, pour la vitesse un bidirectionnel. Les microphones généralement utilisés par les preneurs de son sont cardioïdes et captent donc une combinaison de la pression et du gradient de pression.

Le choix d'un microphone à vitesse sera justifié pour l'enregistrement d'un speaker en ambiance bruyante, le microphone privilégiant le champ proche constitué par la voix du speaker émettant approximativement des ondes sphériques quand sa voix est située dans le registre grave et médium.

2.2. En ce qui concerne la prise de son, nous renvoyons au bulletin du G.A.M N° 65 de M. CEOEN pour les détails.

Le microphone ne simulant pas l'oreille, le métier du preneur de son est artistique au sens plein du terme car celui-ci doit toujours réinterpréter ce qu'il perçoit pour le transmettre comme il l'entend ou comme un auditeur l'entendrait. Il faudrait d'ailleurs plus justement parler des prises de son, car les méthodes du preneur de son classique sont très différentes de celles mises en oeuvre pour enregistrer du jazz, de la variété, ... Dans les musiques contemporaines, la prise de son fait souvent partie intégrante de l'oeuvre, celle-ci passant par l'intermédiaire d'un système électroacoustique avant d'arriver aux oreilles de l'auditeur.

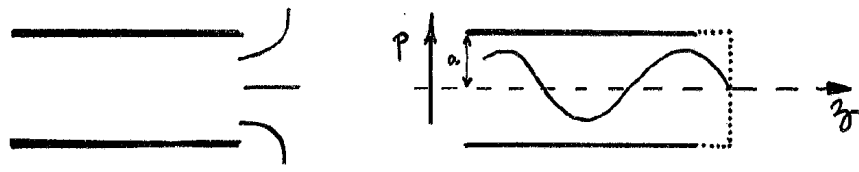
Même chez les preneurs de son de musique classique, il y a différentes écoles : il y a les partisans du microphone par instrument, d'autres du couple stéréophonique, ou du microphone proche associé à un microphone d'ambiance, ou bien de la tête artificielle. Bref c'est une question d'esthétisme, de mode, de situation (salle, disposition...). Disons de façon très générale que le preneur de son, en plaçant son microphone trop près de l'instrument s'expose aux fortes inhomogénéités de directionnalité et aux bruits parasites de fonctionnement tel le souffle du musicien, les bruits mécaniques, les frottements... en reculant son microphone il lissera ces inhomogénéités du fait des réflexions et réverbérations de la salle mais augmentera le bruit de fond et perdra en "présence". Il s'agira donc souvent pour lui de faire un délicat compromis donnant une certaine perspective de l'objet sonore.

On peut se rendre compte d'une recherche méthodique de prise de son effectuée par H. Scherchen à la fin des années 40, à l'aide d'un seul microphone omnidirectionnel dans un studio de Beromünster (Suisse) (cité par J. Bernhardt) (cf. figure 21). L'influence de la paroi du fond a amené Scherchen à regrouper ses musiciens contre cette paroi. La cinquième disposition fut celle retenue.

## II - DONNEES ANALYTIQUES SUR LE RAYONNEMENT DES SOURCES

Un certain nombre d'études analytiques expérimentales et théoriques de la directivité d'un tuyau percé de trous à doigté donné ont été effectués et nous allons donner un aperçu des résultats.

Le fonctionnement interne de l'instrument étant assez bien connu, le rayonnement s'en déduit à partir de la connaissance des sources quasi ponctuelles



CORRECTION DE LONGUEUR



Figure 22

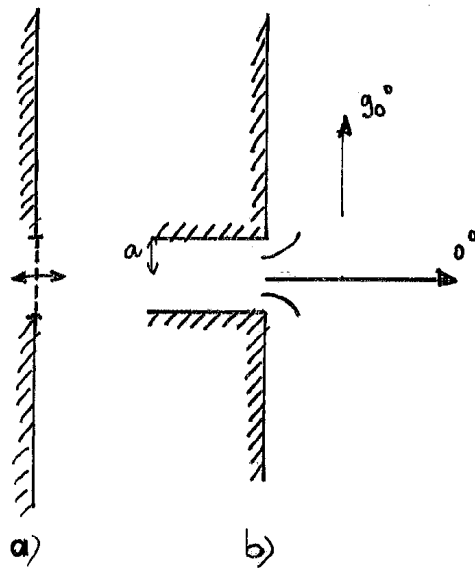
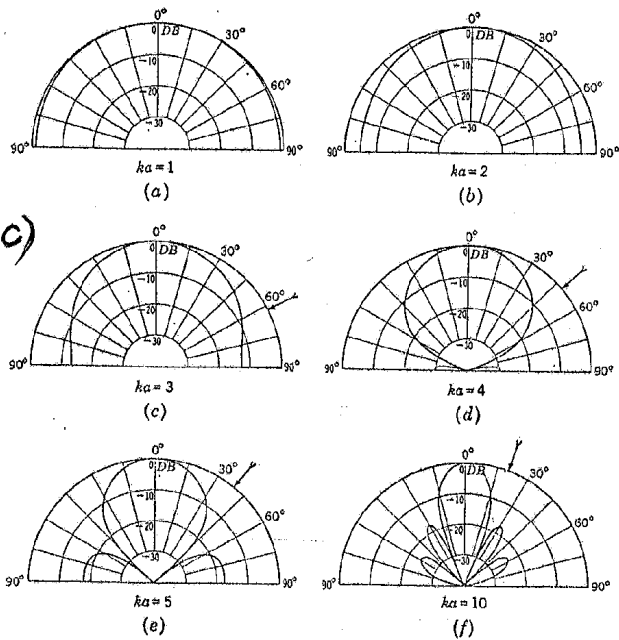
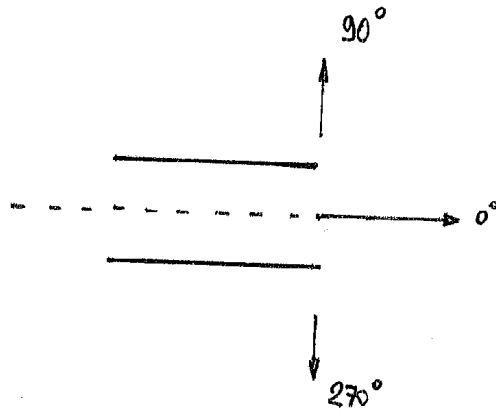


Figure 23

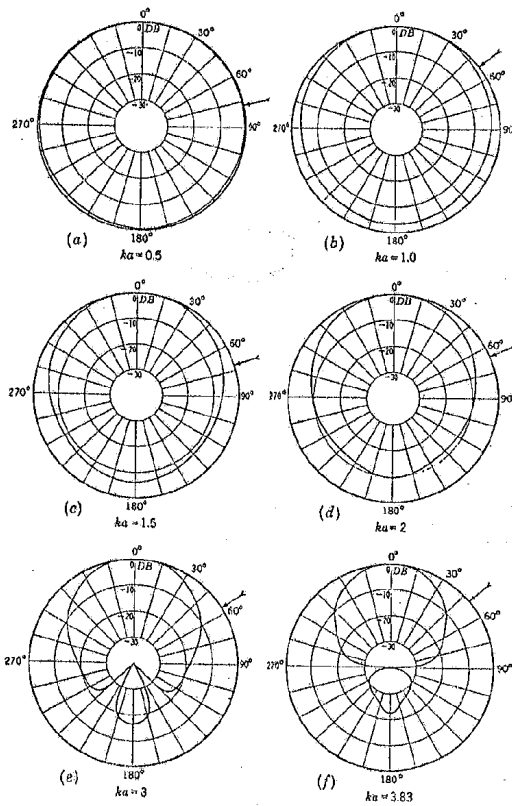






LEVINE & SCHWINGER

figure 24



que constituent les trous de l'instrument (leurs dimensions étant petites vis-à-vis des longueurs d'ondes). On peut ainsi remonter du fonctionnement interne au rayonnement externe.

Pour des instruments à sources étendues comme le violon, la guitare, les percussions, ... les modèles sont quasi-inexistants mais font l'objet de plus en plus de recherches. Les difficultés résident dans la description des modes de vibration de plaques vibrantes de formes complexes et couplées, dont on connaît assez mal les systèmes d'excitation et le rayonnement : les approximations que l'on a pu se permettre dans le cas des sources de dimensions petites ne sont hélas plus valables, les longueurs d'onde devenant dans ce cas comparables aux dimensions de l'émetteur.

### 1. Rayonnement par un tuyau ouvert

Au siècle dernier, de nombreux physiciens se sont intéressés à la "correction au bout" des tuyaux sonores. Quand un tuyau rayonne dans l'espace infini, les ondes stationnaires s'étendent un peu en dehors du tuyau et il faut en tenir compte pour évaluer les fréquences de résonance: aux basses fréquences, le tuyau se comporte comme un tuyau allongé d'une certaine "correction de longueur" (cf. fig.22) proportionnelle au rayon du tuyau, qui déboucherait brutalement sur une pression toujours égale à la pression atmosphérique (la pression acoustique, variation de pression autour de la pression atmosphérique, étant donc nulle). Ainsi non seulement la masse d'air occupant l'intérieur du tuyau vibre mais aussi celle située au voisinage de l'extrémité du tuyau.

Helmholtz et Rayleigh ont été les premiers à proposer une théorie de ce phénomène; mais ils se sont du même coup intéressés au fait que les ondes ne sont pas purement stationnaires : il y a une petite proportion d'énergie émise par le tuyau pour arriver à nos oreilles. Il convient de la connaître quantitativement en fonction de l'énergie stationnaire dans le tuyau, mais il est aussi très intéressant de connaître sa directionnalité.

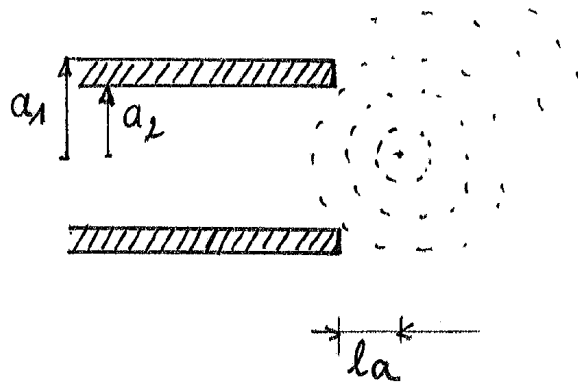
a) Rayleigh a étudié le cas du piston plan dans un écran infini (cf. figure 23 a); il a discuté avec une intuition remarquable la différence de comportement entre un tuyau cylindrique de rebord infini (cf. figure 23 b), et un piston plan; ses conclusions ont été confirmées depuis. Nous dirons ici que la différence est en tout état de cause assez faible - l'extrémité du tuyau vibrant presque en ondes planes, comme le piston aux basses fréquences. La correction de longueur pour le piston vaut  $8/3\pi \times a$  ( $\approx 0,85a$ ) et  $0,82a$  pour le tuyau si  $a$  est le rayon du tuyau.

On remarque sur la figure 23 c que pour les basses fréquences (rayon très inférieur à la longueur d'onde,  $Ka < 1$ ) le rayonnement est omnidirectionnel : pour les instruments à trous latéraux, le rayon est presque toujours inférieur à la longueur d'onde, sauf dans l'extrême aigu du spectre.

b) Levine et Schwinger, beaucoup plus tard (1948) ont résolu le problème du tuyau sans rebord : la correction de longueur est  $0,6133a$ , et les diagrammes de directivité (cf. figure 24) ne diffèrent pas qualitativement des précédents, si ce n'est que le tuyau rayonne dans tout l'espace et non plus dans un demi-espace.

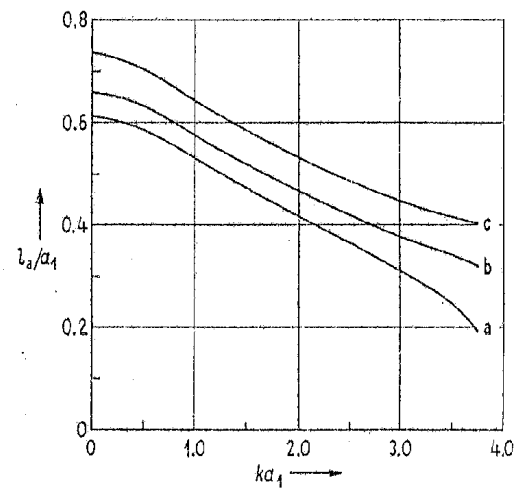
c) Enfin Y. Ando 1969 a effectué le calcul pour le cas général du tuyau avec rebord non nul, qui correspond pour les instruments à vent à l'épaisseur de la paroi. Pour les fréquences assez basses, les résultats diffèrent peu de ceux de Levine et Schwinger, ce qui se comprend intuitivement si le rebord est très

...../

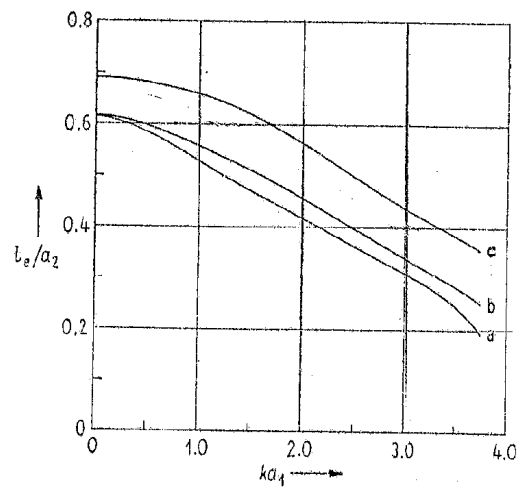


CENTRE ACOUSTIQUE

figure 25

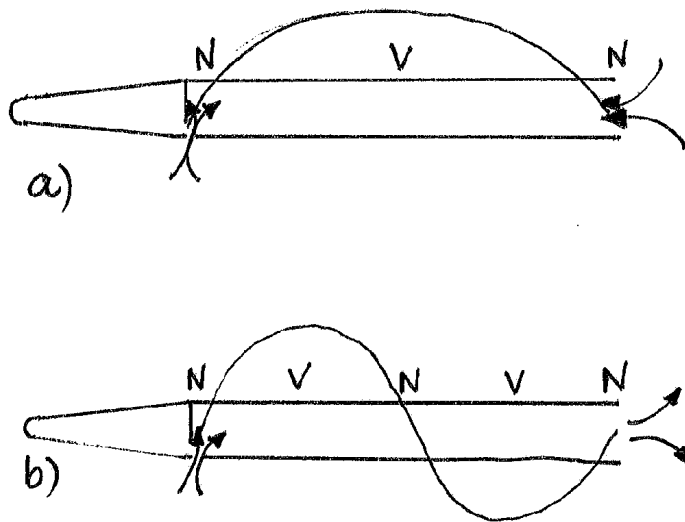


CORRECTION D'EXTREMITE



COURBES

- a)  $a_2/a_1 = 1.00$
- b)  $a_2/a_1 = 0.85$
- c)  $a_2/a_1 = 0.70$

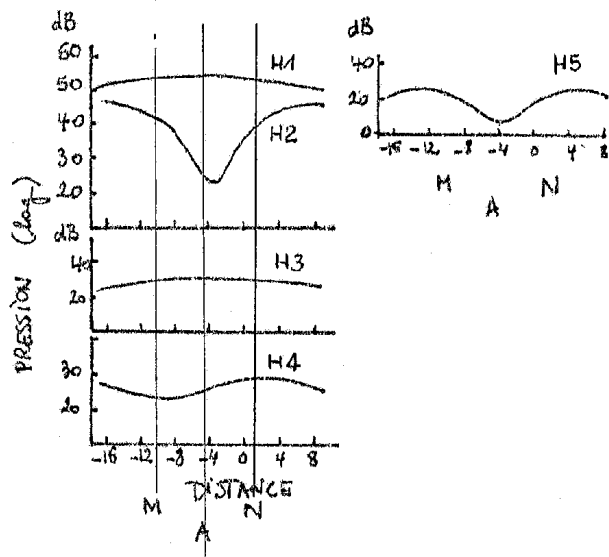
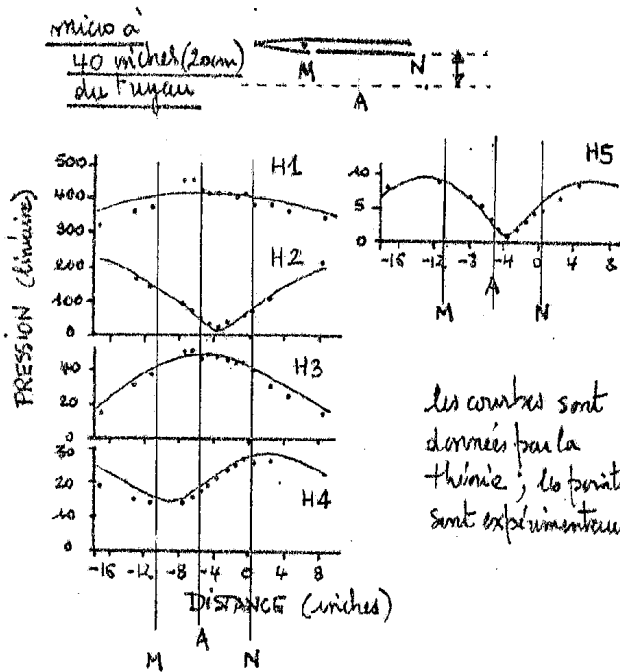


mode de fonctionnement du tuyau d'orgue pour

a) fondamental des particules impaires et harmoniques impaires du particel fondamental

b) harmoniques paires

figure  
26



petit par rapport à la longueur d'onde. Mais il a ajouté un résultat très intéressant, en calculant et mesurant pour confirmation, la position du centre des ondes sphériques rayonnées loin du tuyau (cf. figure 25) : il montre que celui-ci se situe presque à l'endroit de l'extrémité du tuyau corrigé par la "correction au bout", autrement dit que sa distance à l'extrémité vraie du tuyau est presque égale à la correction de longueur (égale s'il n'y a pas de rebord).

## 2. Rayonnement par deux sources

### 2.1. Etude sur le champ externe

Le premier problème qui se pose est celui de l'interaction de ces deux sources. Ainsi dans un calcul effectué pour les fréquences relativement basses (cf Annexe n° 1), on montre que lorsque deux sources émettent identiquement (même amplitude et même phase) la puissance totale n'est pas deux fois la puissance de l'une d'elle mais quatre fois celle-ci. La puissance fait en effet intervenir des termes quadratiques qui sont responsables de ce résultat. De même, si l'on double la surface d'un piston, on quadruple la puissance émise. La raison fondamentale est que les sources n'émettent pas comme si elles étaient seules, indépendantes l'une de l'autre, mais interagissent l'une sur l'autre.

De façon générale, si les sources sont d'amplitudes différentes, le champ rayonné est de structure monopolaire si on l'observe de suffisamment loin. Si les sources sont d'amplitudes égales et en opposition de phase (vitesses acoustiques de sens contraires à un instant donné, alors le rayonnement est dipolaire c'est-à-dire de très faible efficacité.

Le premier à avoir pensé le champ résultant de deux sources comme un champ d'interférences pour un instrument de musique est P.A. Northrop, qui expliqua la directivité du tuyau d'orgue de cette façon. Il déduisit des observations que pour les fréquences correspondant aux fréquences fondamentales des partiels impairs, ou ceux harmoniques impairs du partiel fondamental, les deux extrémités du tuyau vibrent en phase (les vitesses acoustiques sont de même sens à un instant donné) et donc le champ acoustique est assez régulier. Pour les harmoniques pairs c'est le contraire : les extrémités vibrent en opposition de phase et il existe donc un minimum très accusé à mi-distance des deux sources (cf. figure 26 a) et b)).

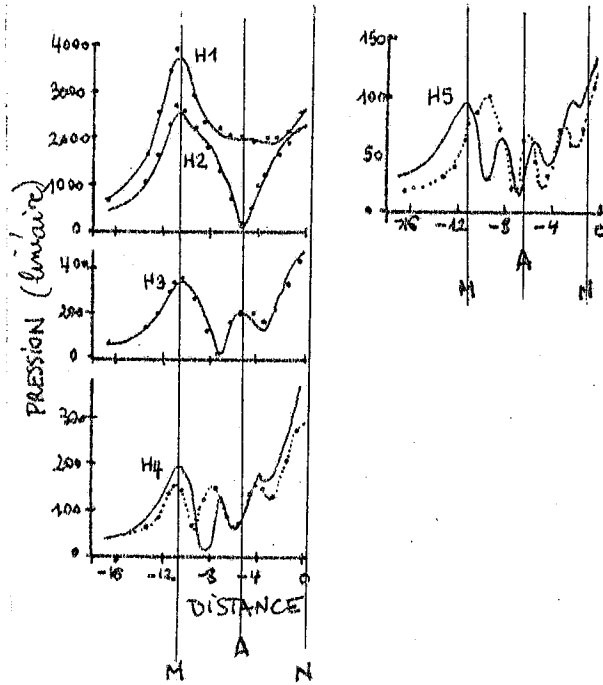
Il faut garder à l'esprit que pour qu'il y ait interférence il faut que les deux sources soient d'intensité égale : c'est à cette condition que les différences de phase entre celles-ci interviennent.

Faisant le calcul en considérant les deux sources comme sources d'ondes sphériques il obtient le champ de pression et de vitesse avec un très bon accord entre l'expérience et la théorie (cf. figure 26 c)). Les courbes donnent la prédiction théorique, les points sont les résultats des mesures effectuées pour deux distances de microphone se déplaçant parallèlement au tuyau.

Dans un des deux cas on a tracé la courbe en échelle logarithmique (dB) comme c'est habituel en acoustique (cette échelle accentue les différences proches de zéro et diminue celles pour les grandes valeurs). Notons enfin que Northrop utilise un analyseur en fréquence qui lui permet de mesurer l'amplitude de la pression (ou de la vitesse) pour chaque harmonique.

Plus récemment F. Wu et P. Péro en faisant une analyse de Fourier (en amplitude et phase) en un nombre égal de points à celui des orifices d'une flûte

moins à 1 1/2 inches (3.8 cm)



c) COMPARAISON EXPERIENCE-THEORIE  
DU CHAMP  
D'INTERFERENCES A L'EXTERIEUR  
D'UN TUYAU  
D'ORGUE  
(NORTHROP)

figure 26 suite

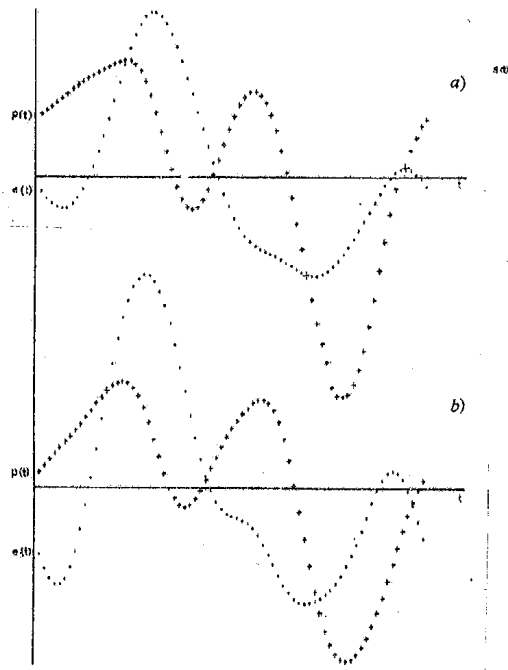
WU & PÉRIO



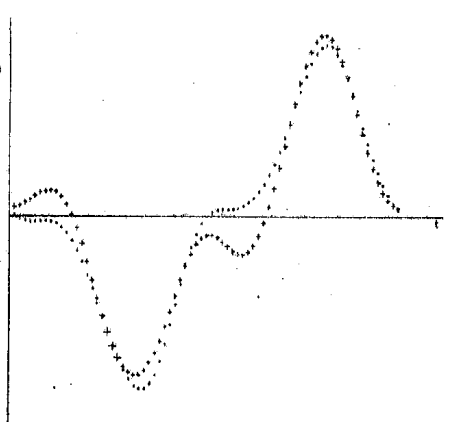
$x_s$

flûte à bec dont on ne considère que 2 sources  
 $s$ : point de mesure du champ de pression

CALCULÉ →



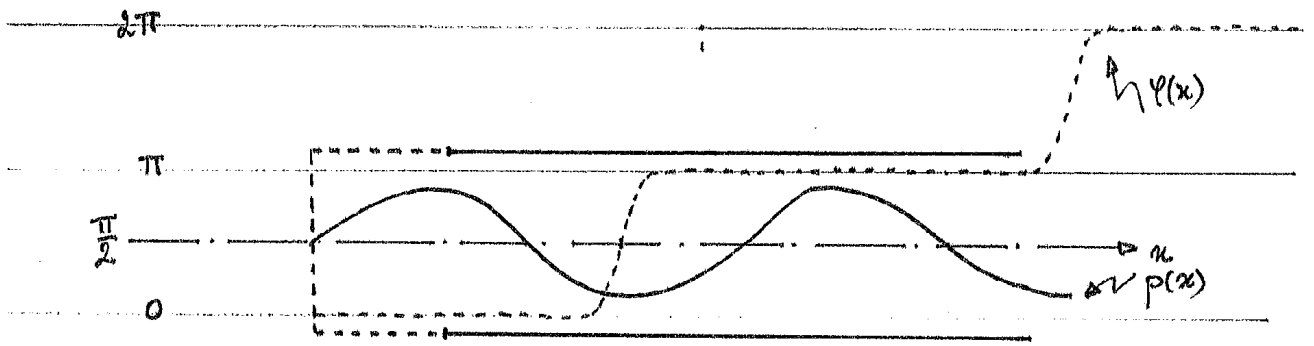
MESURÉ →



1) COMPARAISON DES FORMES  
DES SIGNAUX A 1 CM  
DES SOURCES E & P

2) COMPARAISON DES  
FORMES DES SIGNAUX  
MESURÉS &  
RECONSTITUÉS EN  
UN POINTS A  
PARTIR DES SOURCE  
CALCULÉES

Figure 27

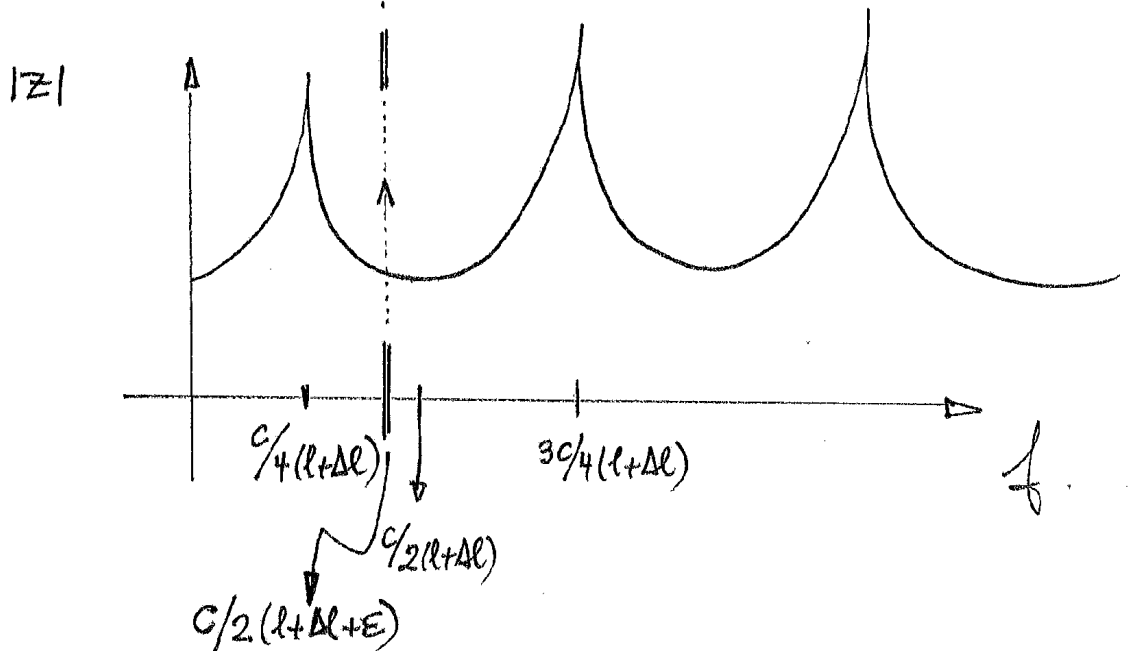
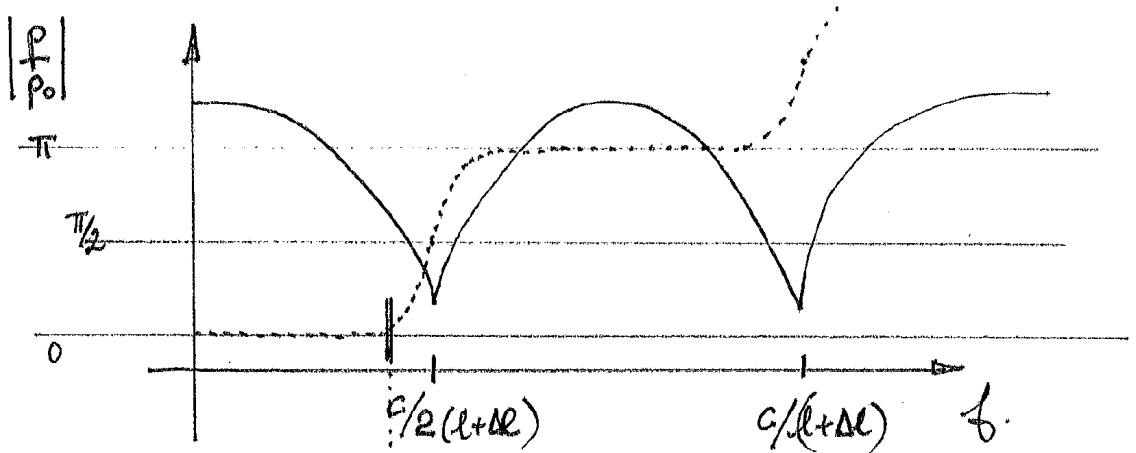
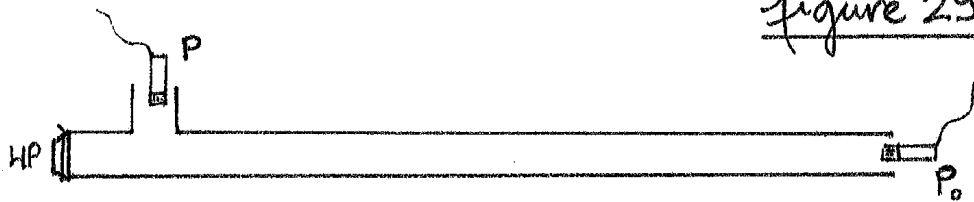


COMPORTEMENT DES ONDES DU TUYAU À UNE FRÉQUENCE EXCITATRICE DONNÉE

figure 28

COMPORTEMENT EN UN POINT EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE

figure 29





à bec et en remontant aux spectres des sources, ont pu déduire en très bon accord le champ de pression en n'importe quel point, vérifiant ainsi les hypothèses que nous sommes en présence d'un champ d'interférences d'ondes sphériques en champ proche (les expériences n'ont pas été faites en chambre sourde, ils montrent donc également qu'en champ proche la réverbération de la pièce est négligeable (cf. figure 27).

2.2. Etude sur le champ interne

Comment peut-on expliquer que les deux sources (embouchure et pavillon) soient de même amplitude et soient en phase ou opposition de phase ? Nous allons remonter au champ interne de l'instrument pour répondre à ces questions en résumant certains résultats.

- Comportement des ondes du tuyau à une fréquence excitatrice donnée :

A l'intérieur du tuyau, l'onde incidente émise par le système exciteur se propage le long du tube jusqu'au pavillon où une partie est transmise à l'extérieur, l'autre est réfléchiée et se superpose avec les ondes incidentes formant ainsi une onde stationnaire (à noter que ceci se passe même si on n'est pas à une fréquence de résonance du tuyau). Les valeurs de l'amplitude et de la phase de la pression suivant la variable d'espace  $x$  sont données par le diagramme suivant (cf. figure 28): à chaque minimum de la pression, le déphasage par rapport à 0 passe rapidement de 0 à  $\pi$  puis de  $\pi$  à  $2\pi$ ..., au minimum il vaut exactement  $\frac{\pi}{2}$ .

- Comportement en un point donné (l'entrée du tuyau) en fonction de la fréquence

Voyons maintenant pour les différents partiels comment vibre l'air situé à l'endroit des 2 sources constituées par l'embouchure et le pavillon.

Pour cela traçons le module du rapport des pressions d'entrée et sortie ainsi que le module de l'impédance d'entrée  $|Z|$  défini comme le rapport de  $\frac{P}{U}$  où  $U$  est le débit, et qui caractérise la réaction du tuyau lorsque l'on veut le mettre en vibration (les instrumentistes à vent ressentent bien cette impression de résistance). (cf. fig. 29).

Les minimums de  $\left| \frac{P}{P_0} \right|$  correspondent aux fréquences de résonance du tuyau de longueur corrigée  $l + \Delta l$ . Sachant que la flûte fonctionne pour un minimum d'impédance d'entrée et tenant compte de la correction de longueur  $\epsilon$  due au rayonnement de l'embouchure faisant passer les fréquences à  $n \times \frac{c}{2(l + \Delta l + \epsilon)}$  =  $f_r$ , alors la figure montre que les deux sources sont en phase pour l'harmonique 1 du partiel 1, puis en opposition de phase (déphasage de  $\pi$ ) pour l'harmonique 2 du partiel 1 ....

On pourrait montrer qu'elles rayonnent avec le même débit acoustique c'est-à-dire la même amplitude. (Pour un instrument à anche, l'embouchure n'est plus une source de rayonnement externe; d'autre part ce type d'instrument fonctionne pour un maximum d'impédance d'entrée; les fréquences de fonctionnement sont alors  $c/4l$  pour l'harmonique 1 du partiel 1 ....)

Anche	$P_1 \left\{ \begin{array}{l} H_1 \quad c/4 (l + \Delta l) \\ H_2 \quad 2c/4 (l + \Delta l) \dots \end{array} \right.$	$P_2 \left\{ \begin{array}{l} H_1 \quad 3c/4 (l + \Delta l) \\ H_2 \quad 6c/4 (l + \Delta l) \dots \end{array} \right.$
-------	--	---

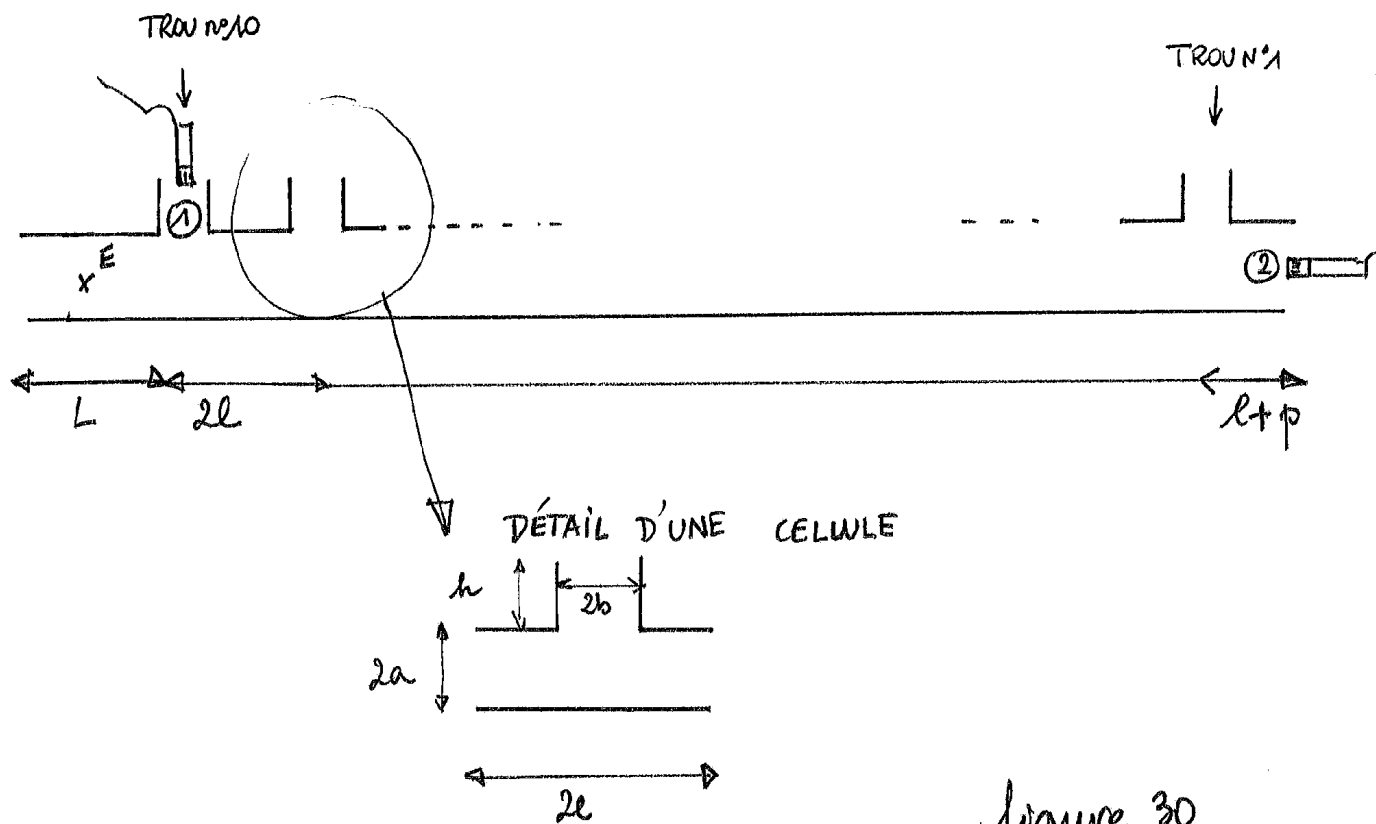
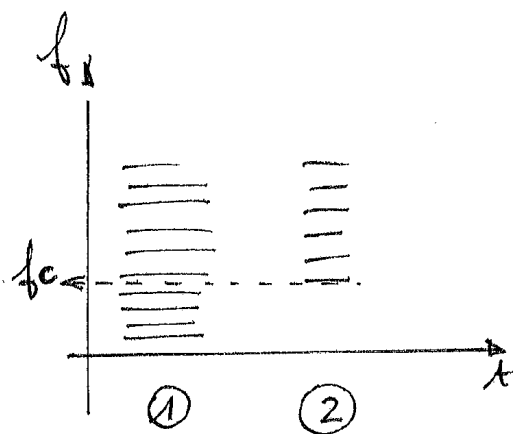
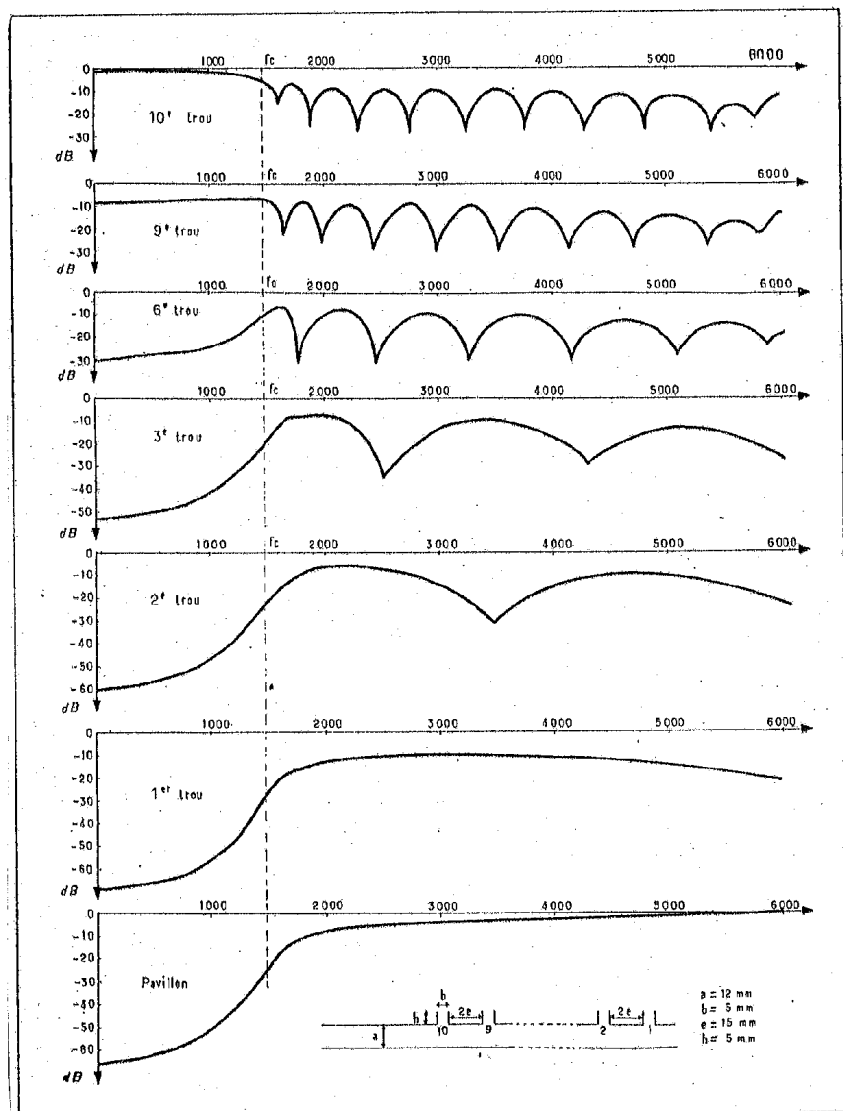


figure 30



DETERMINATION DE LA  
FRÉQUENCE DE COUPURE  
PAR SONAGRAMME  
30 a)

30 b) INTENSITÉS EMISES PAR LES  
DIFFÉRENTS TROUS (CALCULÉES)

$$\left( \frac{E_{\text{trou}}}{E_{\text{totale rayonnée}}} \right)$$

$$\text{Flute } P_1 \begin{cases} H_1 & c/2 (\ell + \Delta\ell + \varepsilon) \\ H_2 & 2c/2 (\ell + \Delta\ell + \varepsilon) \end{cases} \quad P_2 \begin{cases} H_1 & 2c/2 (\ell + \Delta\ell + \varepsilon) \\ H_2 & 4c/2 (\ell + \Delta\ell + \varepsilon) \end{cases}$$

### 3. Rayonnement d'un tuyau percé de plusieurs trous (fig.30)

L'étude du champ interne permet donc de connaître les relations d'amplitude et de phase des diverses sources d'un instrument à vent. Voyons en particulier ce qu'il en serait pour un tuyau comportant un réseau régulier de trous latéraux (on peut montrer que le comportement d'un instrument réel n'est pas trop différent qualitativement de ce cas "idéal"). Ce réseau se comporte comme un filtre quand on ne s'intéresse qu'à la propagation dans le tuyau principal (cf. Benade et Kergomard).

Ainsi on a : a) une bande d'arrêt de  $0$  à  $kc_1 = \frac{1}{\ell (v + \frac{1}{3})^{1/2}}$  qui correspond à la fréquence de coupure du filtre. Une méthode d'évaluation de cette fréquence consiste à comparer les deux sonagrammes délivrés respectivement par un microphone placé près du premier trou et un autre près du pavillon (très près d'une source, on peut admettre que le rayonnement dû aux autres sources est négligeable; la figure 30a correspond au résultat de certains instruments riches en harmoniques, tels les instruments à anches; pour la flûte il faut évaluer quantitativement la différence d'amplitude de chaque harmonique).

Cette fréquence de résonance correspond d'ailleurs à la résonance du résonateur de Helmholtz constitué par la première cellule (F. Laloé).

b) Ensuite il y a une bande passante de  $kc_1$  à  $kc_2 = \pi / 2\ell$ , les résonances correspondent à peu près à celle du tuyau non percé de trous, de longueur :  $L + (2n - 1)\ell + p + \frac{n}{k^2 v \ell}$  où le dernier terme est un terme correctif.

c) La zone de fréquences aiguës se décompose en une bande d'arrêt de  $kc_2$  à  $kc_3 = \frac{\pi}{2\ell} (1 + \frac{4}{v\pi^2})$  puis d'une bande passante de  $kc_3$  à  $kc_4 = \frac{\pi}{\ell}$ ; ces fréquences en général très aiguës jouent un rôle peu important sauf pour certains instruments à trous étroits et espacés, pour lesquelles elles se situent dans le spectre de l'instrument. La figure 30b montre les courbes théoriques, mais vérifiées de façon satisfaisante par l'expérience, des amplitudes de rayonnement des différents trous.

En ce qui concerne le rayonnement on peut remarquer que :

- aux basses fréquences, le rayonnement se fait essentiellement par les premiers trous ouverts, qui émettent en phase avec une amplitude exponentiellement décroissante quand on s'éloigne de l'entrée du réseau.
- en général, et sauf aux très hautes fréquences, on a un champ d'ondes stationnaires dans le tuyau principal; les trous émettent avec des intensités très variées et il y a une dominance de trous en phase ou en opposition de phase. Cependant si un trou se situe exactement à un minimum d'amplitude, il est en quadrature de phase par rapport aux trous adjacents, le champ, quoique très compliqué est à tendance dipolaire.

A la lumière de ce que l'on a dit du fonctionnement interne, on s'aperçoit que puisque chaque trou favorise tel harmonique ou tel autre, chaque note

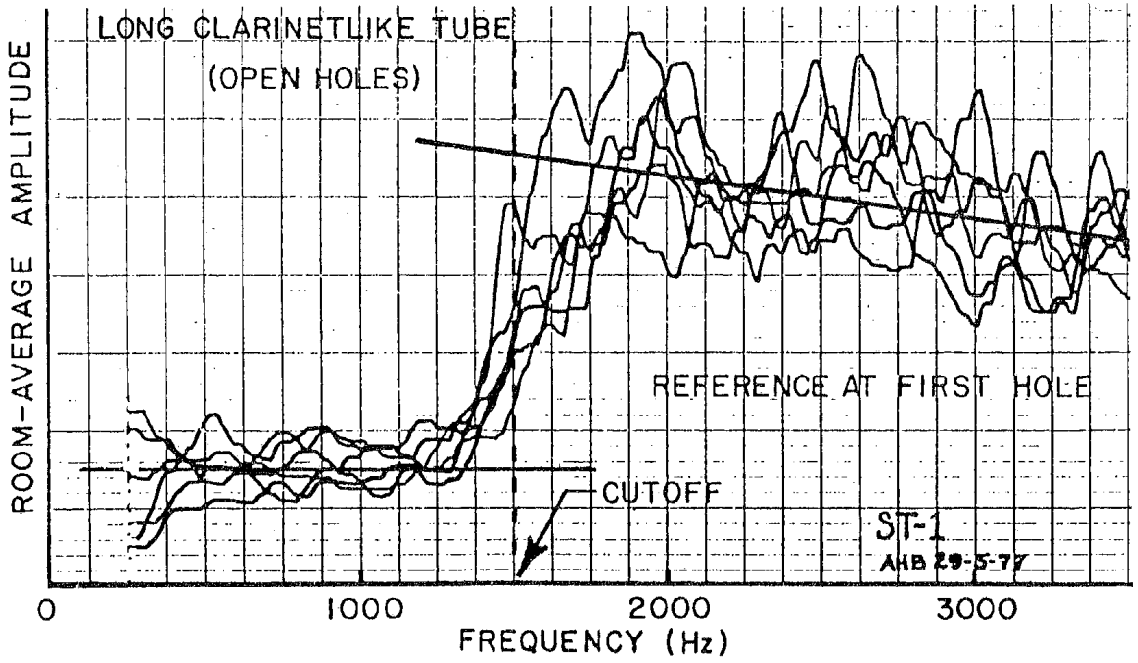


figure 31

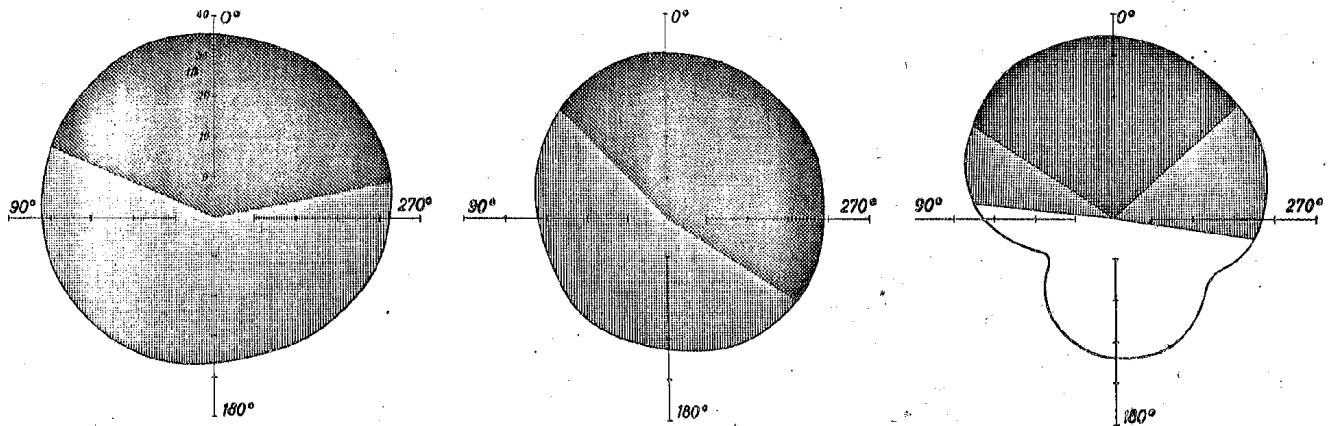
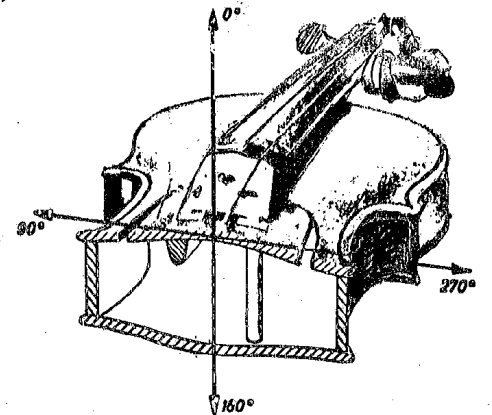
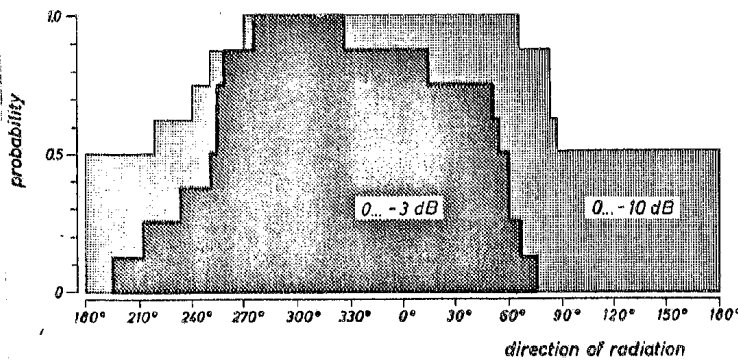


figure 32 a)



Directionnalité du violon à 1000 Hz : diagrammes polaires d'instruments différents et histogramme pour les régions de plus fort rayonnement. (échantillonnage de 8 violons).

sera rayonnée de manière différente. Près des trous on aura une grande inhomogénéité de timbre, par exemple, dans la zone  $kC_1 - kC_2$  et la directionnalité changera à chaque doigté. A partir du rayonnement de chaque source, le calcul du champ d'interférences reste à faire. A noter que ce qui précède vaut pour des régimes établis, il faudrait l'étendre à la réponse aux transitoires (attaques de l'instrument), si important pour l'identification de ceux-ci.

#### 4. Sources étendues - les cordes

Pour les instruments à cordes, les modèles analytiques sont quasiment inexistant, cependant de nouvelles méthodes d'holographie acoustique, d'antennes.. développées notamment par Williams, Maynard, Skudrzyk et Weinreich permettent, connaissant le champ proche sur un certain domaine de le reconstruire partout et de connaître le rayonnement des sources. Ainsi en étudiant la guitare dans la gamme de 78 à 425 Hz, ils montrèrent que la rosace était la source dominante dans la gamme 78 à 266 Hz et reste dominante jusqu'à 425 Hz.

### III - APPROCHE GLOBALE DE LA DIRECTIONNALITE DES INSTRUMENTS DE MUSIQUE

1. Nous allons maintenant exposer des approches plus globales, c'est-à-dire plus proches de celles du preneur de son. En particulier, la nôtre s'attache à faire des moyennes dans le temps afin de rendre compte d'une impression globale de directionnalité; elle diffère donc sensiblement des approches analytiques présentées au chapitre précédent, que ce soit pour les instruments à trous latéraux ou les instruments à cordes. Nous avons vu le rayonnement comme fonction de la fréquence pour un doigté donné, mais lorsque le doigté change, la même fréquence peut être rayonnée de manière très différente : en effet une fréquence peut correspondre aux harmoniques de plusieurs notes et par conséquent à différents doigtés, donc à des directivités très différentes. Ceci justifie à notre avis l'intérêt de faire des moyennes pour obtenir des résultats interprétables du point de vue auditif. Etant entendu que lorsque l'on perçoit un instrument de côté, de face... et dans des salles différentes, on arrive toujours à le reconnaître !. Benade a procédé à partir de cette constatation à l'enregistrement en différents points d'une salle, du son délivré par une clarinette (cf. fig. 31). Il est frappant de constater que pour un instrument, la moyenne est caractéristique de celui-ci et qu'en particulier la fréquence de coupure reste bien définie. Jansson a procédé à l'enregistrement de gammes avec quatre microphones et donne les écarts des niveaux des microphones deux à deux. Notre démarche a été similaire : nous avons fait jouer un morceau "représentatif" de l'instrument à un musicien placé en chambre sourde et analysé les signaux délivrés par neuf microphones.

Cette façon de procéder est différente de celle de J. Meyer qui s'attache, par exemple pour le violon, à considérer l'instrument intrinsèquement et à l'exciter avec un vibreur mécanique placé sur le chevalet.

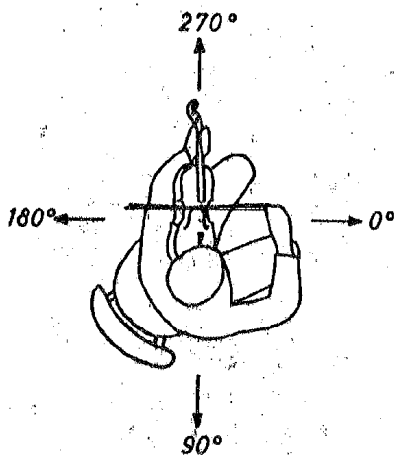
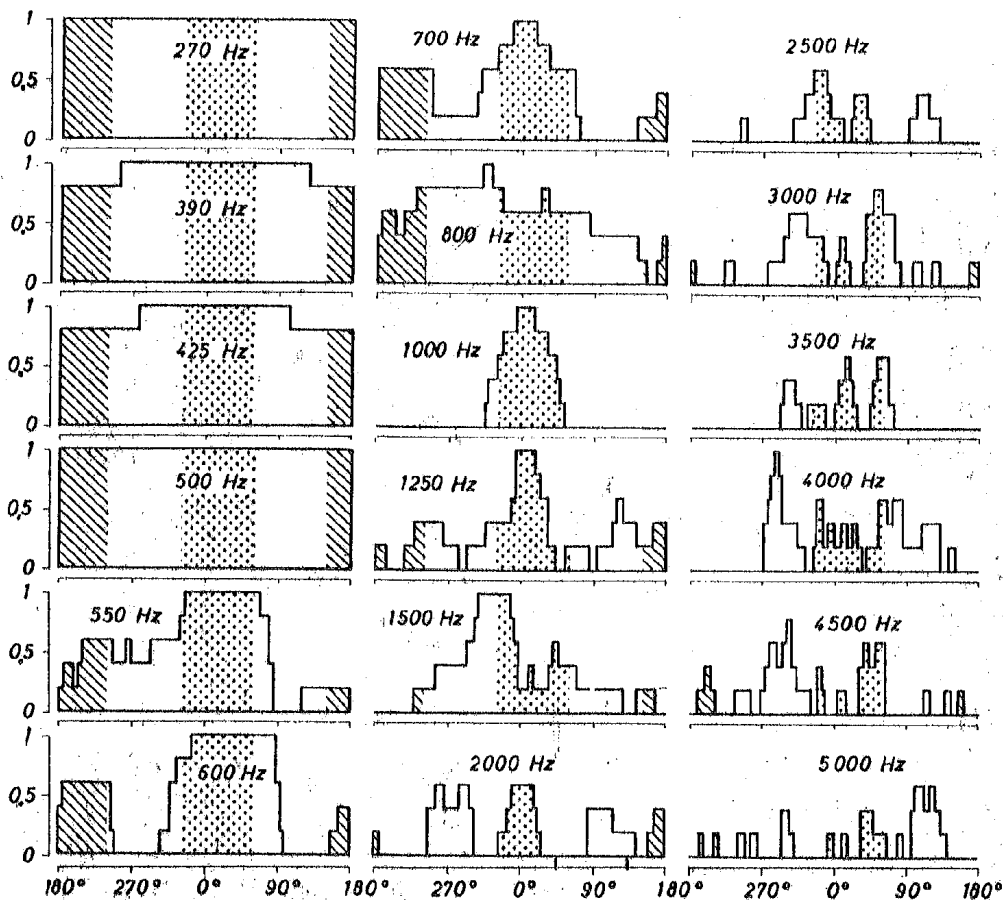
Par ailleurs Martin, en 1942, a tracé les courbes de directionnalité du cor et du cor excitées par une bouche artificielle. On montrera aussi quelques courbes intéressantes obtenues par R. Caussé pour le trombone muni de sourdines.

#### 2. LES EXPERIENCES DE J. MEYER, MARTIN, BERNHART

J. MEYER a, de façon systématique, étudié la directionnalité des instru-

...../

DIRECTIVITY OF STRINGED INSTRUMENTS



DIRECTIVITÉ DU VIOLON  
(J. MEYER)  
*Figure 32 b)*

J. MEYER

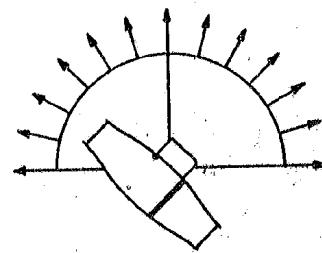
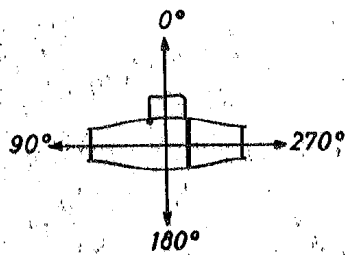
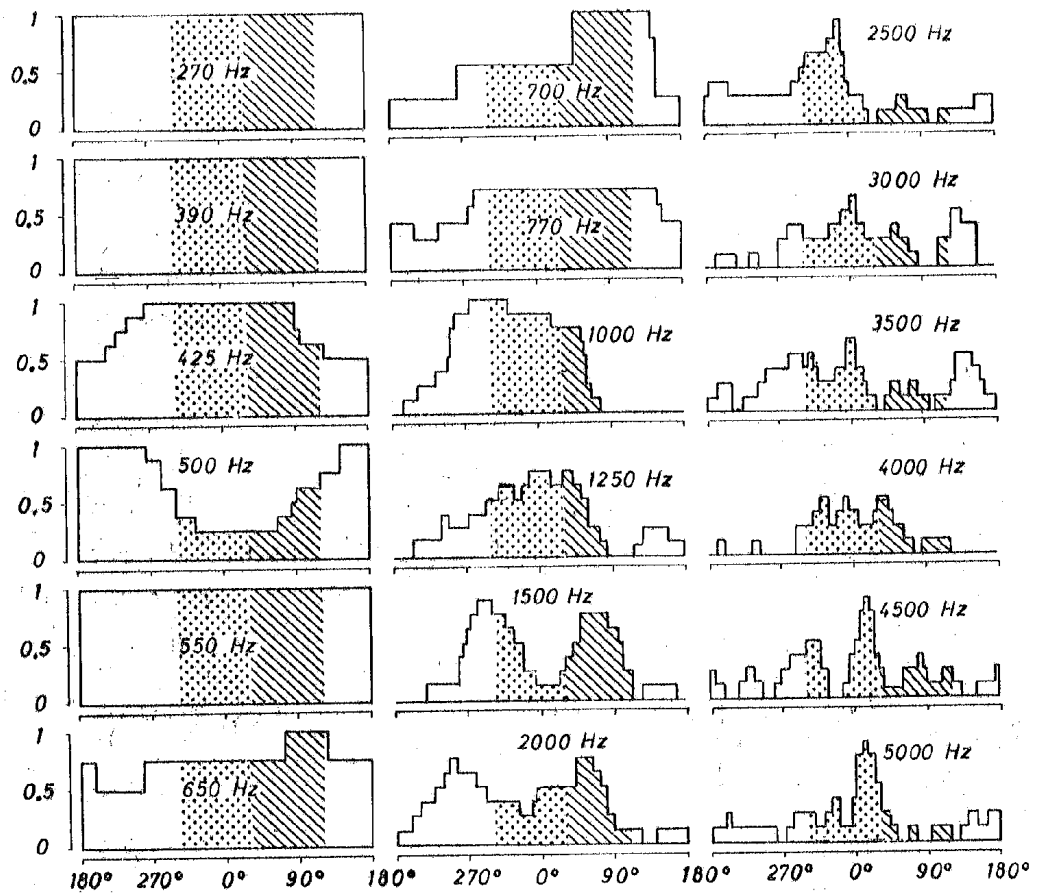


FIG. 9. *Left side:* Probability diagrams for the principal radiation directions of a violin (plane of the bridge). *Dotted region:* angle range for direct radiation or by reflection from the floor to the audience from the first violins. *Cross-hatched region:* corresponding angle range for the second violins using the German seating arrangement.

figure 32 c)

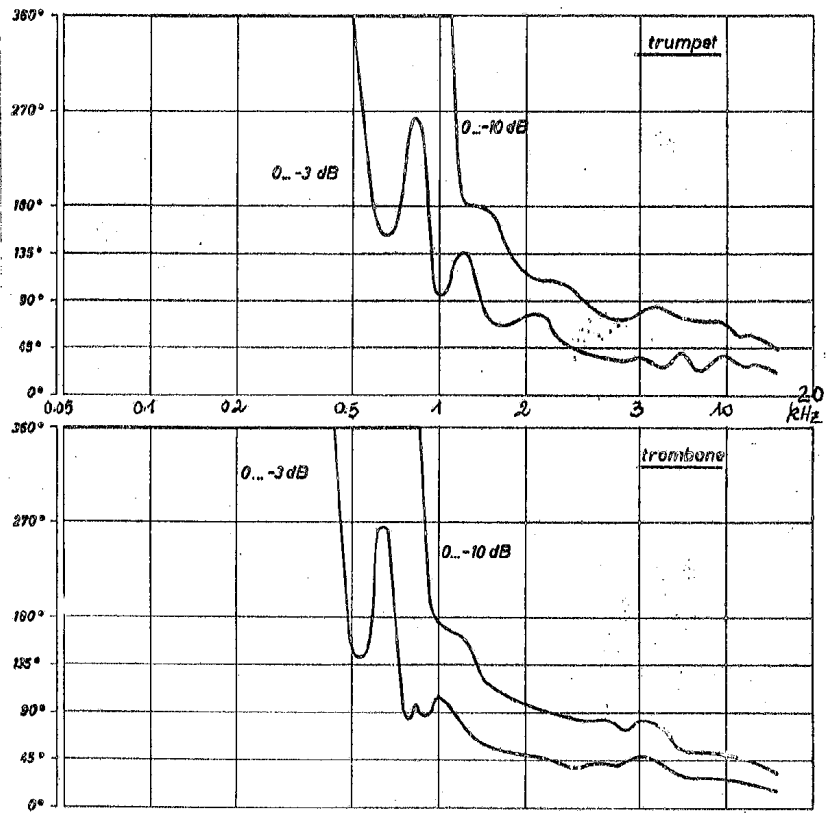
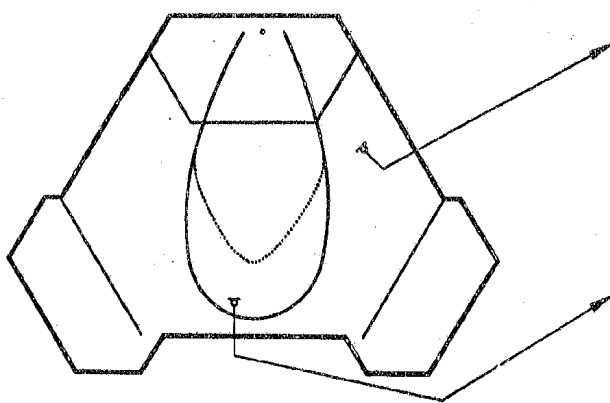


figure 33

City Hall Brunswick



0 10 20 30 m

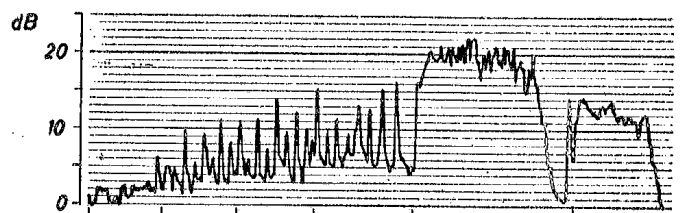
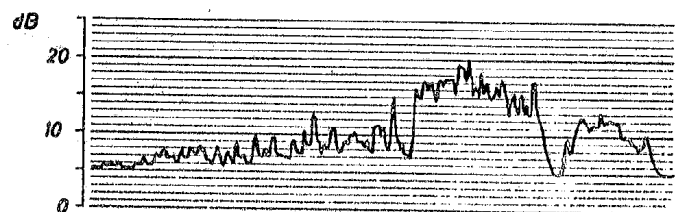
room-radius of a trumpet

..... 6000 Hz — 10000 Hz

J. MEYER

octave filter level

8000 Hz mid frequency



Fl. <sup>63</sup>  
 Tr. <sup>63</sup>  
 Tr.b. <sup>63</sup>  
 Vln.1 <sup>63</sup>  
 Vln.2 <sup>63</sup>  
 Vla. <sup>63</sup>

Bruckner  
 9th Symphony  
 1st movement  
 score excerpt

DIRECTIONNALITÉ DE LA  
 TROMPETTE

figure 34



ments de musique. Pour de plus amples détails nous renvoyons aux deux bulletins du G.A.M. et à ses livres et articles. Donnons de façon succincte sa façon de procéder. Prenons l'exemple du violon : J. Meyer place celui-ci, excité par une vibration sinusoïdale du chevalet, sur une table tournante et enregistre avec un micro placé à 3 m 50 le diagramme de directivité de l'instrument. Comme les violons semblent avoir des caractéristiques individuelles de directionnalité, différentes de par leur facture, il procède à des moyennes sur un certain nombre d'instruments et présente ses résultats sous la forme d'histogrammes où figurent les régions situées entre 0 et 3 dB en dessous du maximum de niveau sonore, pour différentes fréquences (cf. fig. 32 a,b et c).

La trompette et le trombone sont des instruments qui présentent des courbes de directivité assez simples : leurs caractéristiques tiennent essentiellement aux formes et tailles du pavillon, les effets de vibrations des parois étant négligeables. D'autre part il y a une symétrie de rotation autour de l'axe du pavillon (cf. fig. 33). Les courbes présentent les régions de 0-3dB et 0-10 dB en dessous du maximum. Les angles portés en ordonnée sont ceux d'ouvertures, centrés sur l'axe du pavillon. Pour la trompette, le rayonnement est omnidirectionnel en dessous de 400 Hz. (Le trombone a une tessiture d'environ une octave en dessous de la trompette, mais la forme et la taille des pavillons sont très différentes). J. Meyer est allé dans la salle de concert de Brunswick pour confronter à un cas concret ses résultats. Il a tracé pour cette salle le "Hallradius" qui représente la limite, à fréquence donnée, où l'intensité du son direct est égale à celle du son réverbéré pour un type donné de source défini par son facteur de directivité. Puis il plaça deux microphones, l'un à l'extérieur du rayon, l'autre à l'intérieur et analysa dans la bande 8000 Hz les staccatos des trompettes (9° Symphonie de Bruckner, mesure 60 du 1er mouvement). On peut constater (cf. fig. 34) la différence de netteté des staccatos ce qui confirme ce que l'on disait à propos du travail du preneur de son qui fait un compromis entre champ direct et champ réverbéré.

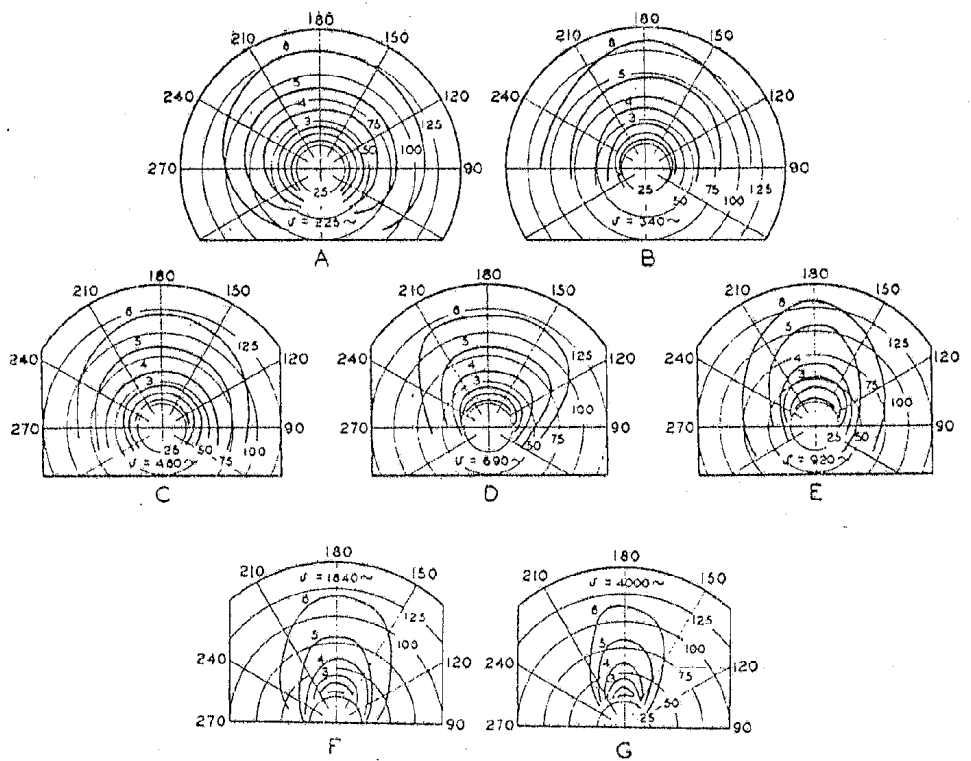
Martin, dès 1942, avait tracé les diagrammes de directivité du cornet excité par une bouche artificielle (cf. fig. 35). On remarque la prédominance des harmoniques supérieurs dans l'axe du pavillon, tandis qu'aux basses fréquences il y a omnidirectionnalité (les dimensions du pavillon sont dans cette zone de fréquence, petites par rapport aux longueurs d'ondes et la source étendue agit comme si elle était ponctuelle).

René Caussé, de l'IRCAM, a étudié l'effet des sourdines et en particulier sur la directionnalité du trombone (fig. 35 bis) les diagrammes présentés montrent l'effet d'une sourdine sur le rayonnement. Pour plus de détails, on renvoie à son bulletin du G.A.M. consacré à ce sujet.

Notons enfin que J. Bernhart dans son manuel de prise de son de 1949 donne des courbes de directivité du violon, mais il ne précise pas dans quelles conditions ont été faites ces mesures. Pour le piano il donne pour deux notes les lignes d'égales intensités dans le plan de la table d'harmonie (cf. fig. 36).

### 3. LES EXPERIENCES DE JANSON ET LES NOTRES

Janson en 1978 a publié pour le violon l'écart de niveaux délivrés par des micros pris deux à deux, ainsi que la comparaison entre ce qu'entend le violoniste et ce qu'entend un auditeur dans la salle (cf. fig. 37). Les moyennes étaient faites sur des gammes jouées par un musicien en chambre sourde.



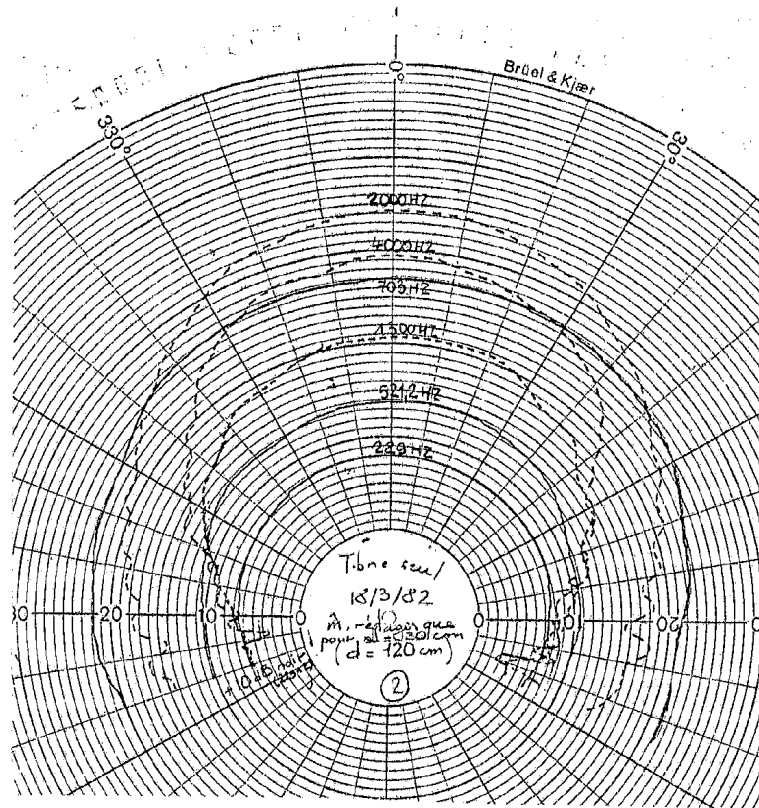
DIRECTIONNALITÉ DU CORNET  
A DIFFÉRENTES DISTANCES

m<sup>o</sup>: (30 cm, 60 cm, 90 cm, 120 cm, 150 cm, 180 cm)  
1 2 3 4 5 6

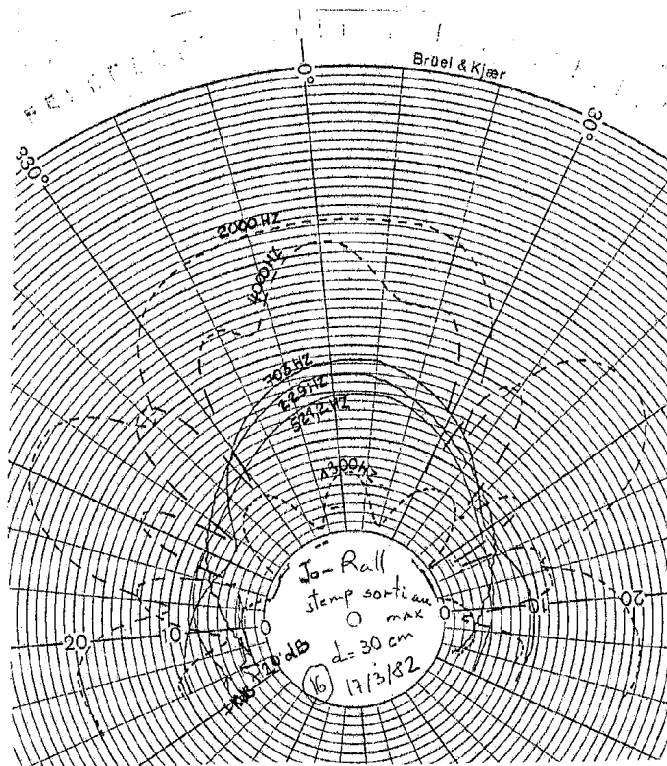
Figure 35

# DIRECTIONNALITÉ DU TROMBONE AVEC & SANS SOURDINE (R. CAUSSE)

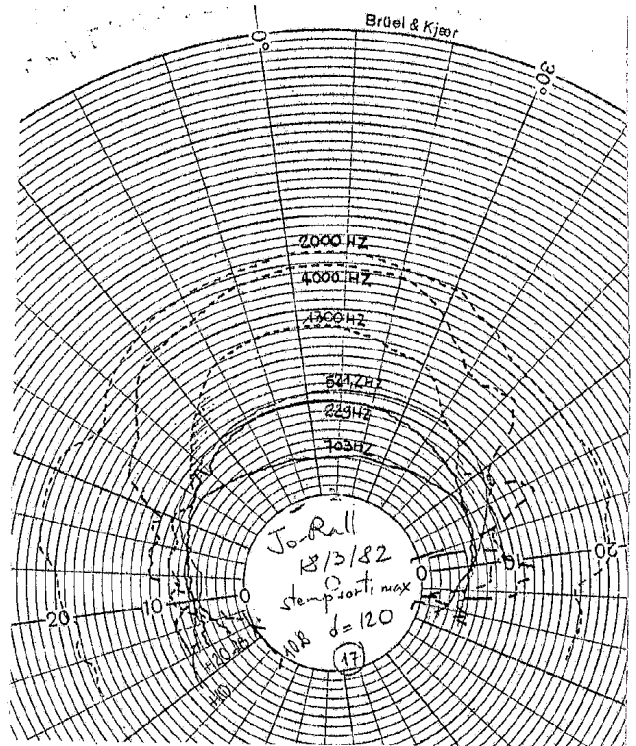
figure 35 b)



TROMBONE SEUL

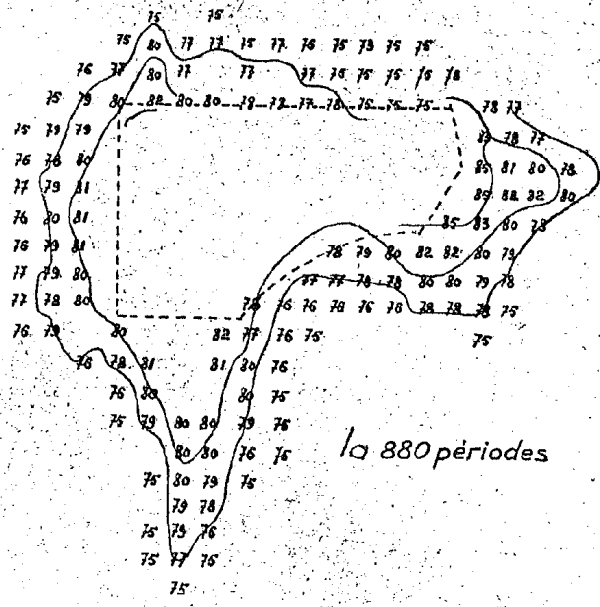


AVEC SOURDINE  
↑  
A 120 cm

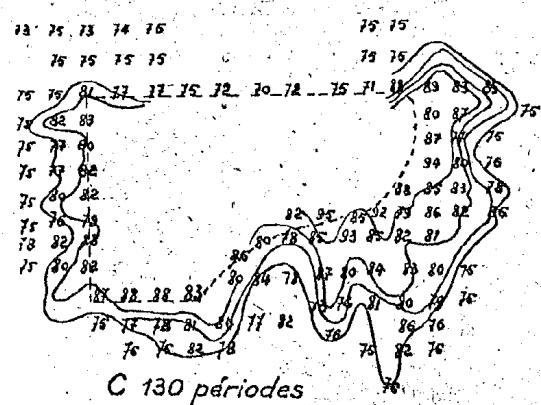


JO - RALL  
STEMP SORTI AU MAXIMUM  
↑  
A 30 cm

COURBES D'ÉGAL NIVEAU SONORE (EN PHONES) D'UN PIANO A QUEUE



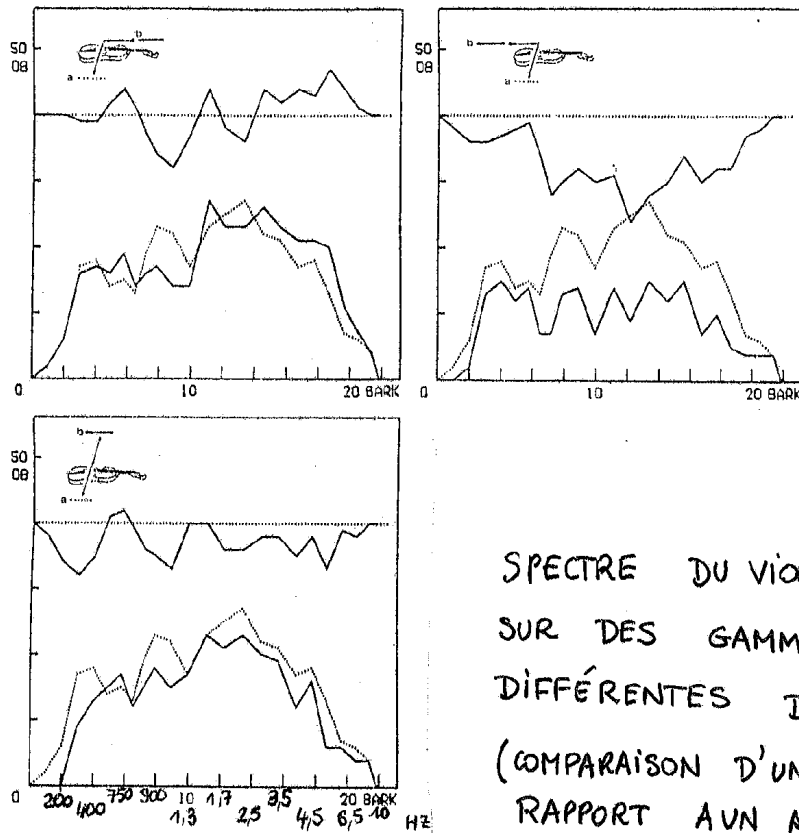
la 880 périodes



C 130 périodes

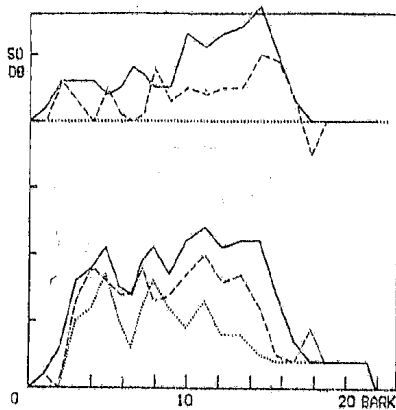
Figure 36

# DIRECTIONNALITÉ DU VIOLON (JANSSON)



SPECTRE DU VIOLON MOYENNÉ  
 SUR DES GAMMES POUR  
 DIFFÉRENTES DIRECTIONS  
 (COMPARAISON D'UN MICRO PAR  
 RAPPORT AUN AUTRE -  
 ENREGISTREMENT EN CHAMBRE  
 SOURDE )

figure 37



COMPARAISON DES SPECTRES  
 ENTENDUS PAR UN AUDITEUR  
 ET PAR LE MUSICIEN

- oreille gauche
- ..... oreille droite
- oreille d'un auditeur

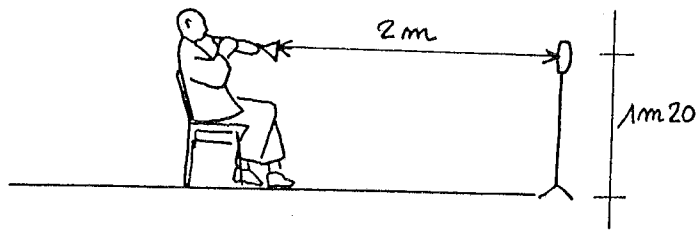
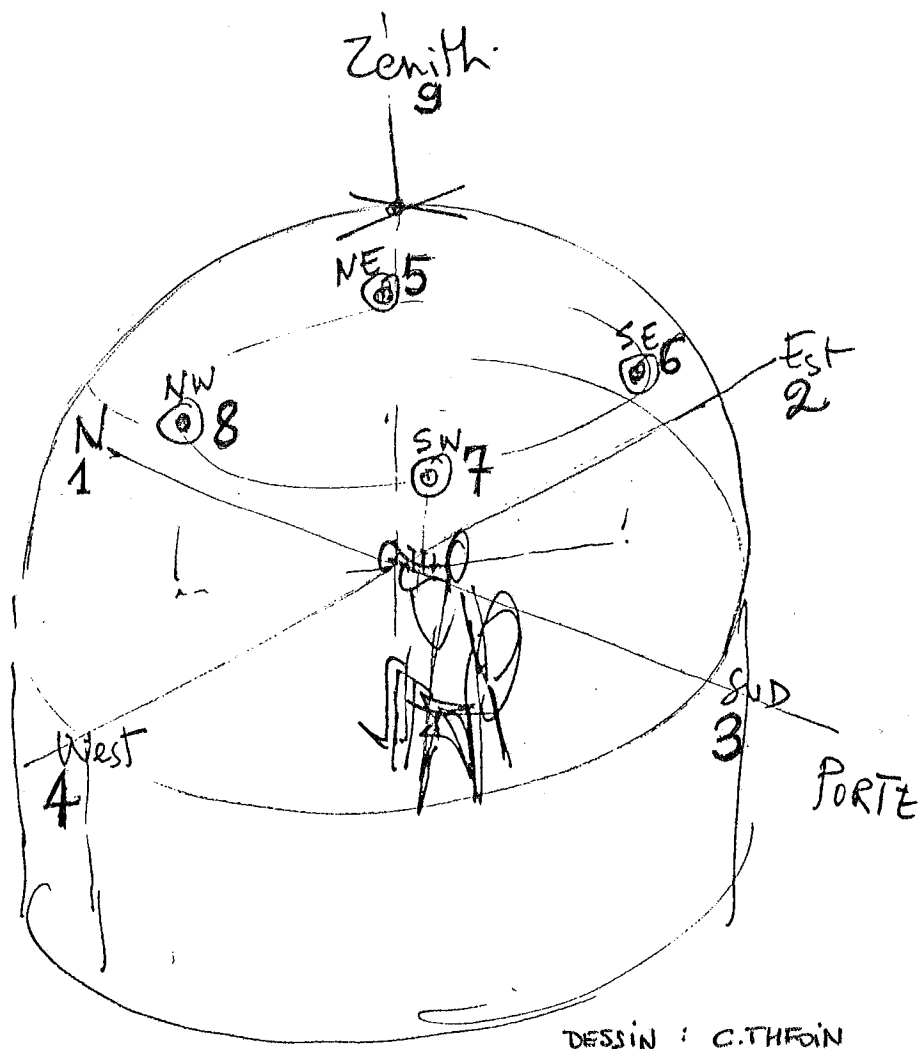


Figure 38



DESSIN : C. THÉOIN

Figure 39

### 3.1. Notre Méthode d'étude

C'est une méthode analogue que nous avons employée. Cette étude, faite en collaboration avec M. THFOIN architecte, vise essentiellement à justifier certains projets architecturaux d'aménagement de salles de concert ; aussi, nous avons adopté une méthode de E. LEIPP se voulant la plus réaliste possible : il s'agit de faire jouer à un instrumentiste placé en chambre sourde une pièce de musique où statistiquement toutes les possibilités de l'instrument sont rassemblées (type morceau de concours) ; on analyse et compare ensuite le signal capté dans différentes directions, on réalise ainsi une "moyenne" sur un morceau qui dure environ 45 s à 2 mn (nous essaierons de justifier au cours de l'exposé cette façon de procéder).

De cette manière, nous avons étudié les instruments suivants : le violon, le trombone, la guitare, le sitar, le cor, la trompette, les flûtes (dont piccolo, en sol et à bec), le clavecin. Je ne présenterai ici que le violon, le trombone et la flûte.

Les enregistrements ont été faits dans la chambre sourde de l'IRCAM, la distance des micros par rapport à l'instrumentiste (2 mètres) nous a été imposée par les dimensions de celle-ci ; la disposition est donnée figure 38

Un des problèmes était de décider du nombre de micros à employer et de leur disposition. Celle-ci devait être fixe : nous avons une semaine pour tout enregistrer et il était impossible de changer de place l'installation qui pour une partie devait être suspendue et demandait un certain temps de réglage. Aussi notre choix s'est arrêté sur 9 micros placés sur une demi sphère de rayon 2 m : au sol, nous avons 4 micros (de 1 à 4) et 5 suspendus, un au dessus (le 9) et 4 à 45° (de 6 à 9) (fig. 39).

Les micros, (des Neumann) étaient réglés en cardioïde pour se soustraire aux effets de diffraction des parois, (les micros étant très proches de celles-ci) et pour utiliser le matériel habituel des preneurs de son. Notons que les micros 5,6,7,8 étaient orientés vers le centre de la sphère qui était à l'extrémité du pavillon pour les cuivres, au chevalet pour le violon ou au centre de la flûte. Nous n'avons laissé au sol que le caillebotis nécessaire pour les pieds des 4 micros et pour la place du musicien.

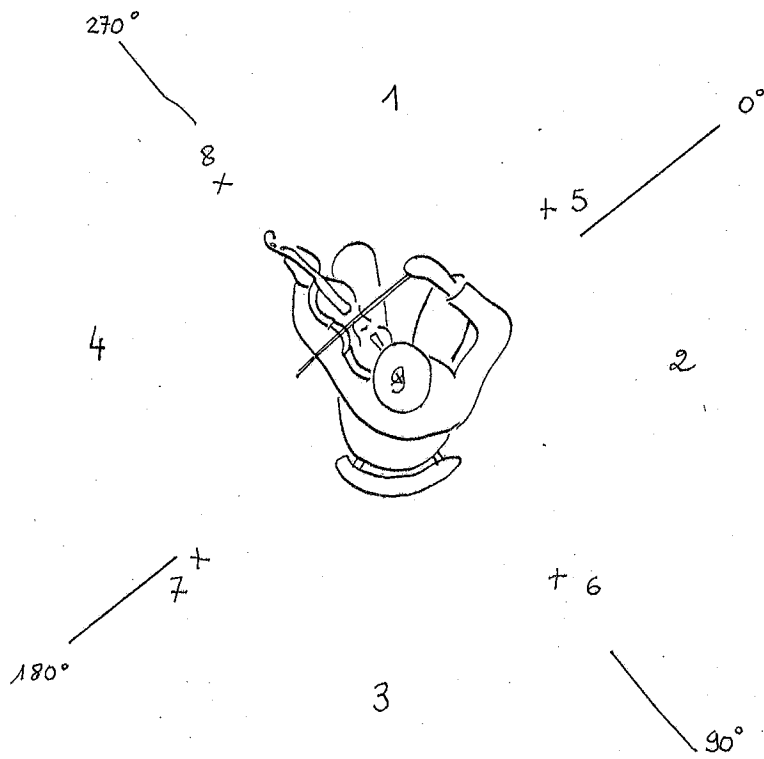
Les micros 5 à 9 étaient suspendus à une structure hexagonale par l'intermédiaire de tiges métalliques recouvertes de laine de verre.

La chambre sourde est reliée à un studio où nous enregistrons sur un "studer" 16 pistes (9 seulement sont utilisées). Les 9 micros avaient des caractéristiques identiques et l'ensemble magnétophone-console avait été vérifié juste avant nos enregistrements.

L'analyse de tous les instruments s'est effectuée au L.N.E. (Laboratoire National d'Essai à Colombes) : les bandes lues par un magnétophone REVOX étaient analysées en tiers d'octaves par un analyseur B. et K. "digital frequency analyser type 2131" piloté par un calculateur H.P. 9825 A, les tracés étaient donnés par une table traçante HP 7525 A.

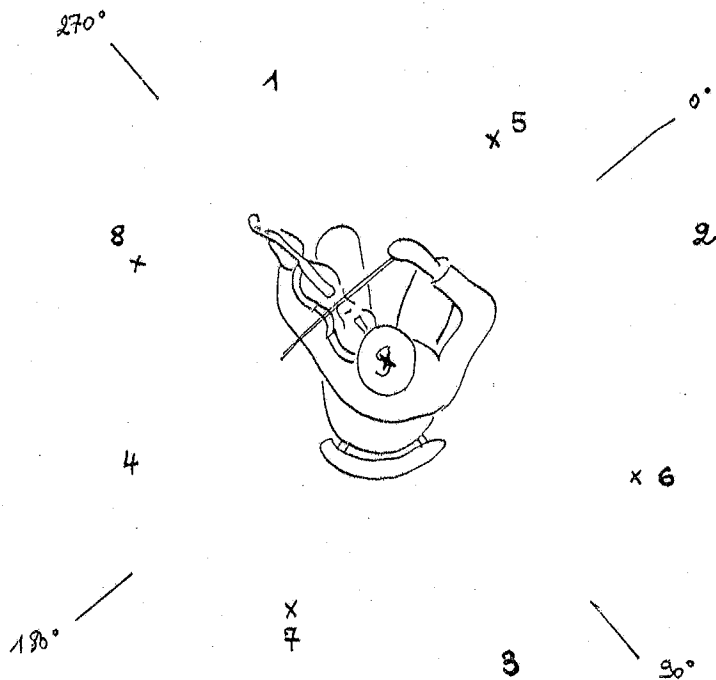
Nous présentons aussi les résultats de l'analyse effectuée par un analyseur mis au point par M. LEIPP et M. SAPALY (E.R.A. - C.N.R.S. N° 537) et dénommé Intégrateur de Densité Spectrale I.D.S.).

Cet analyseur s'attache à donner la "coloration" d'un message sonore



POSITION 1

Figure 40



POSITION 2



au travers de la densité spectrale d'amplitude de 8 bandes sensibles associées à l'oreille humaine et qui ont été déterminées expérimentalement. Le résultat se présente sous la forme de pourcentages apportés par chaque bande sensible (moyenne arithmétique). Enfin pour certains micros nous avons fait des sonagrammes, ceux-ci apportant de précieux renseignements sur les transitoires d'attaques.

### 3.2. Le violon

Les enregistrements ont été effectués par Roland Daugareil - violon solo à l'Opéra de Paris sur un Grancino de 1697. Notre choix fut arrêté sur deux extraits des 1ères sonates et Partita de J.S. BACH qui nous semblaient explorer le spectre de l'instrument. Il s'agit des mesures 38 à 55 de la fugue de la 1ère sonate (noté extrait 1, durant à peu près 50 s) et des mesures 1 à 32 du second double de la première partita (noté extrait 2 : environ 48 s).

Ainsi avec deux morceaux différents, nous pouvons comparer les résultats de leurs analyses et voir si la méthode est valable.

Ne pouvant déplacer les micros, et afin d'augmenter le nombre de points d'enregistrement, nous avons demandé au musicien de rejouer le tout dans une seconde position où il s'est tourné d'une vingtaine de degrés à droite par rapport à la précédente situation. Les figures ci-après donnent ces différentes configurations (fig.40).

A l'analyse, le temps d'acquisition fut pris à 128 s. Les diagrammes spectraux en 1/3 octaves étant assez difficiles à comparer, nous avons décidé de tracer les écarts par rapport au micro qui en moyenne capte le plus fort signal ; pour le trombone et le violon, il s'agit du micro 1 qui sert de référence. Pour les diagrammes de l'IDS, on compare directement les pourcentages.

#### Commentaires des résultats de l'analyse 1/3 d'octave de l'enregistrement de violon pour l'extrait 1 et dans la position 1 (fig. 41)

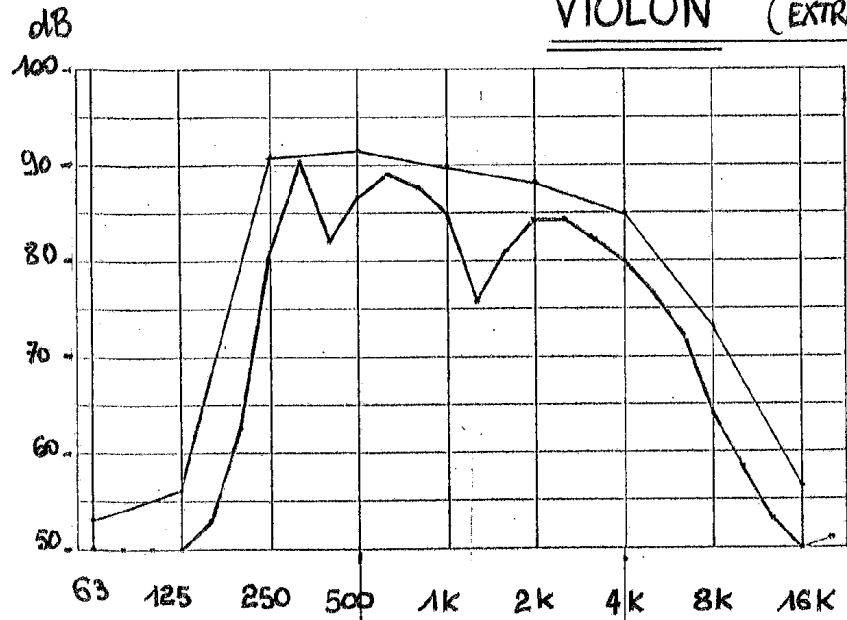
de 160 à 400 Hz : on a une bonne isotropie, les courbes se situent dans une bande de 4 dB, sauf le micro 1 qui est supérieur de 6 à 7 dB en moyenne au reste des micros. Ce micro restera d'ailleurs le plus fort pour pratiquement toutes les fréquences ; le corps du musicien joue donc un très grand rôle d'écran.

pour 500 Hz : les micros 8 et 3 s'écartent des autres, le premier se rapproche du micro 1 à 1 dB, l'autre en étant le plus faible à 12 dB. Les autres restent très voisins.

entre 630 et 1000 Hz : les courbes ont un minimum relatif et sont plus espacées (variation de 11 dB) ; les plus forts sont les 1,8,4 ; les plus faibles les 3 et 7.

pour 1250 Hz : toutes les courbes ont leur maximum absolu situé autour du niveau du micro 1 tandis que le micro 3 reste le plus faible à 7-8 dB en dessous de ce dernier, les micros 9 et 8 sont alors les plus forts à 3 dB au dessus du micro 1. Si l'on excepte le micro 3, il semblerait qu'il y ait une grande isotropie pour cette fréquence.

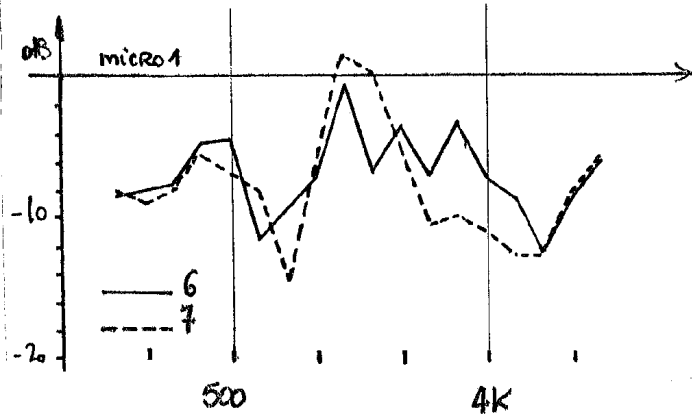
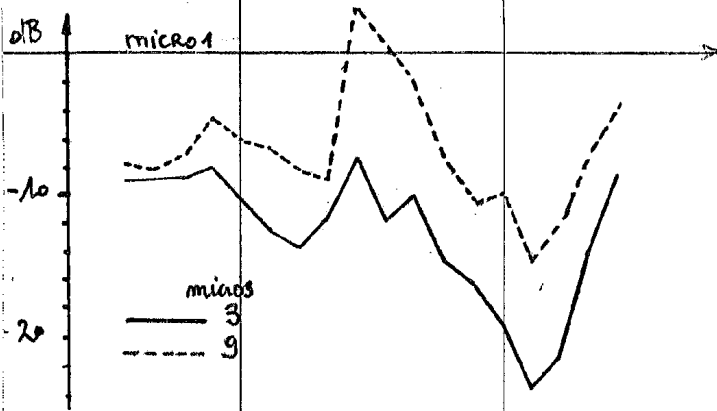
# VIOLON (EXTRAIT 1 POSITION 1)



## ANALYSE SPECTRALE DU MICROPHONE

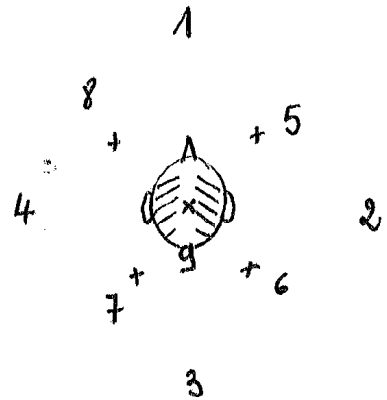
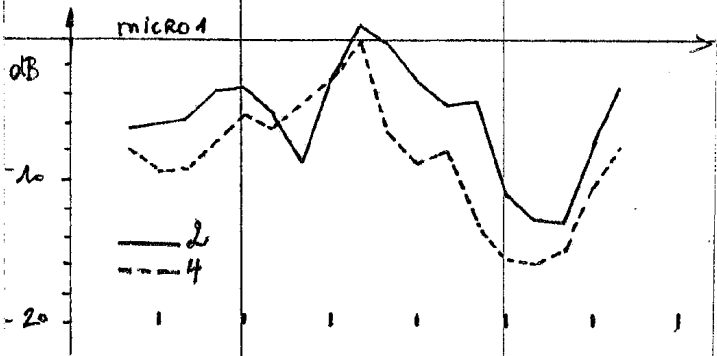
N°1 en octave &  $\frac{1}{3}$  d'octave  
(l'une décalée de 5dB par rapport à l'autre).

figure 41

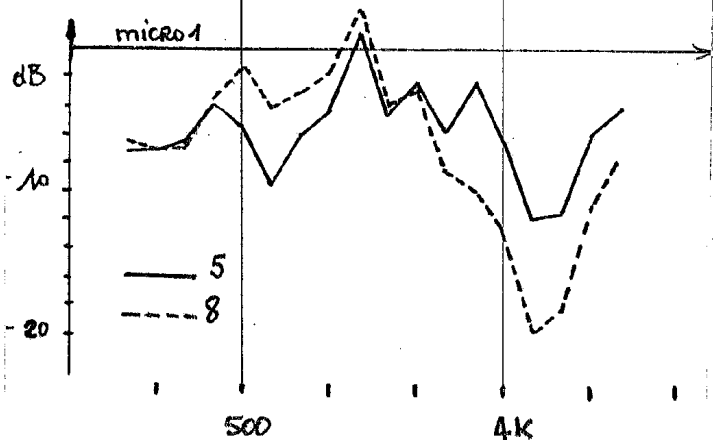


### ECARTS DES AUTRES MICROPHONES PAR

RAPPORT AU N° 1



DISPOSITION DES MICROPHONES



pour 1600 Hz : les micros 5,8,6 ont un minimum local groupé autour de la valeur du micro 4 à environ 3 à 4 dB des plus forts : les 9,2,7 dont les valeurs sont plus proches de celles du micro 1 .

entre 2000-2500 Hz : les valeurs des micros 9,7,8,6 sont très proches, le 2 est un peu supérieur suivi du 5, tous à environ 4 dB du 1 ; les 4 et 7 sont plus faibles mais en gros, il y a une bonne isotropie si on met de côté le 1 et 3.

entre 2500 et 3150 Hz : l'écart se creuse entre les 2,5,6 et 9,4,8,7, les premiers à 6 dB au dessus des autres.

à 5000 Hz : les courbes ont leur minimum absolu, le 6 est à 8 dB du 1 suivi des 5 et 2 à 3 dB, puis les 9,4,8 et enfin le 3 à 25 dB du 1.

Après 5000 Hz : les courbes remontent en se resserrant dans une bande de 5 dB, à peu près 6 dB au dessous du micro 1 ; les micros 5,2,9 sont les plus forts de ce groupe - il faut noter que pour ces fréquences, le signal était assez faible.

Si on examine globalement les courbes, on peut remarquer que les courbes 5 et 6 sont très semblables, mis à part le fait que la 5 est supérieure à la 6 de 2 dB en moyenne.

Les confrontations avec les résultats de J. Meyer sont très difficiles. On ne retrouve pas les zones de directionnalité principales et les courbes à 3 dB ne signifient plus rien : même pour les basses fréquences le micro 1 est à 8-10 dB au dessus des autres.

On peut se demander alors si les extrapolations de J. Meyer à l'acoustique des salles ne sont pas quelque peu hasardeuses dans la mesure où l'on ne considère que la directivité des violons ; le corps de l'instrumentiste semble jouer un rôle très important.

Pour tester notre méthode, nous avons analysé l'autre extrait dans la même position ; voici les résultats :

Commentaire sur les résultats de l'analyse de violon  
de l'extrait 2, position 1 (fig. 42)

de 160 à 400 Hz : on a à nouveau l'isotropie.

630-1000 Hz : ici le micro 9 est l'un des plus faibles à la différence du premier extrait ; le reste est semblable.

pour 1600 Hz : les minimums sont moins marqués (il disparaît pour le 8) mais les plus forts restent les mêmes.

entre 2000 et 2500 : c'est plutôt le 9 et 5 qui sont supérieurs alors qu'il s'agissait du 2 dans le précédent extrait, les autres sont identiques.

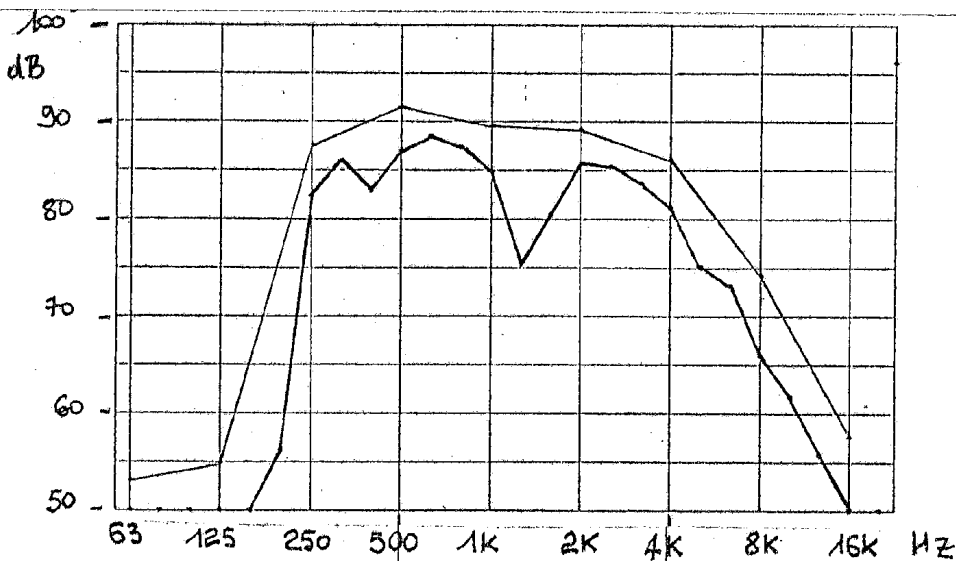
pour 2500-3150 Hz : le 9 est situé au milieu des autres courbes.

Enfin les courbes ont maintenant leur minimum absolu pour 6300 Hz et non plus 5000 Hz ; l'isotropie est grande à 14 dB en dessous du micro 1 (le 3, lui, est à 20 dB en dessous du 1).

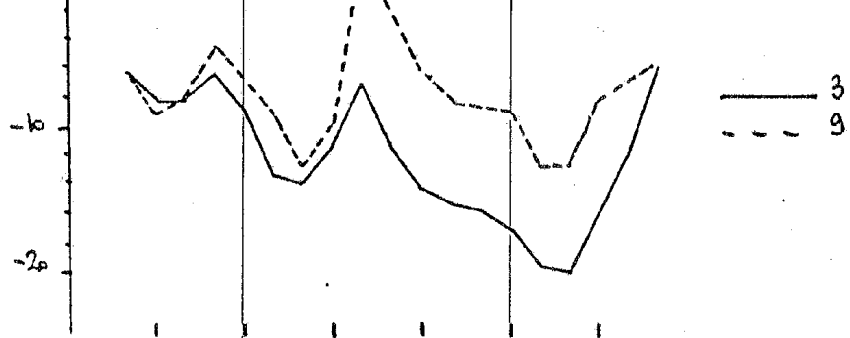
# VIOLON (EXTRAIT 2 POSITION 1)

## ANALYSE SPECTRALE DU MICROPHONE

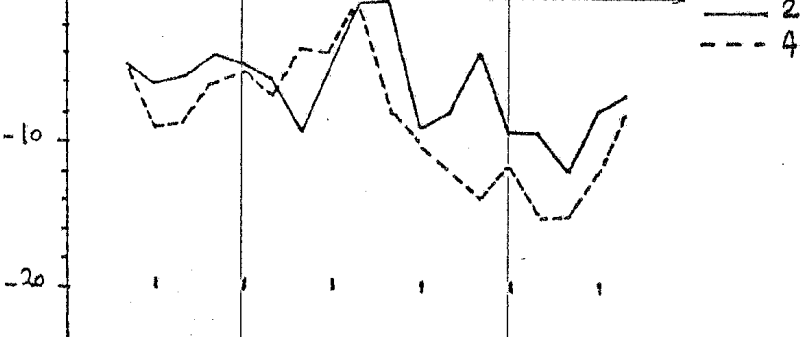
N°1 (octave  $\frac{1}{3}$  d'octave, l'une est décalée de l'autre de 5dB)



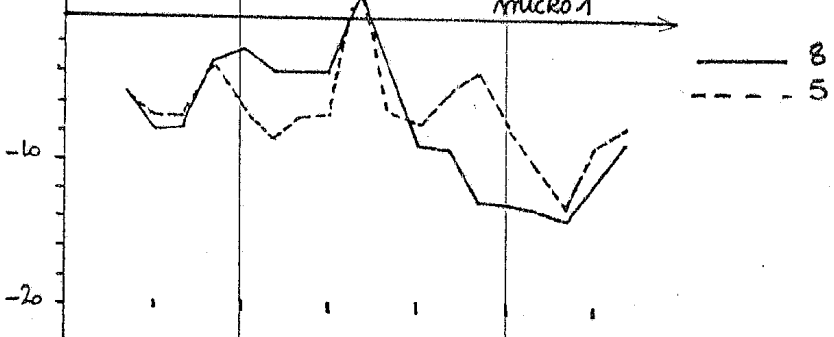
dB ↑ micro 1



dB ↑ micro 1



dB ↑ micro 1



dB ↑ micro 1

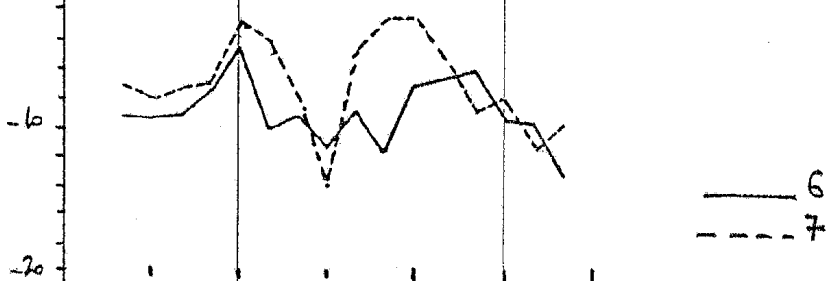
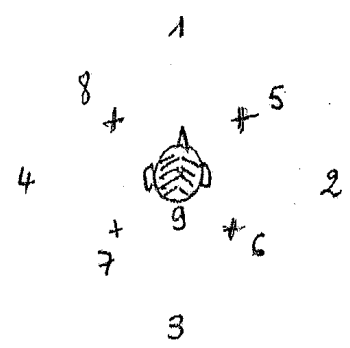


figure 42

### ECARTS DES AUTRES

### MICROPHONES PAR RAPPORT

AU N° 1

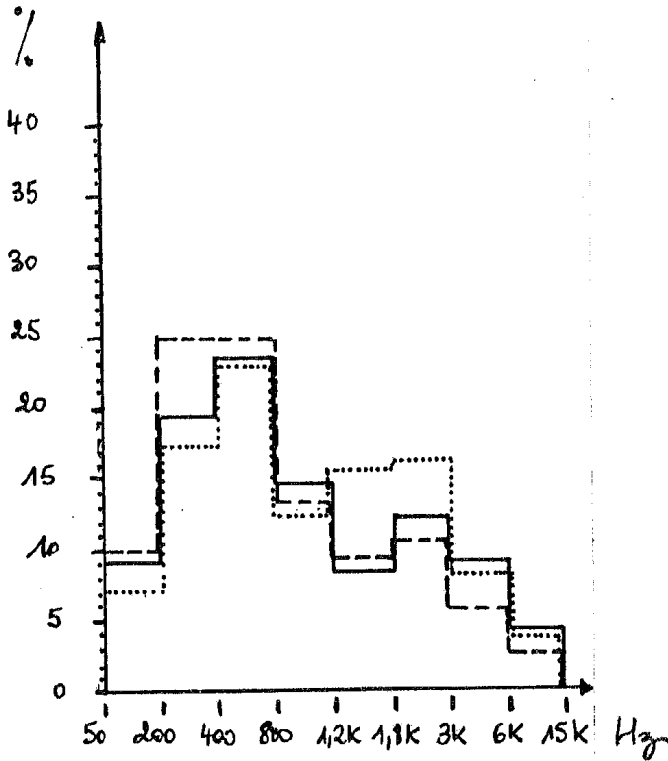


### DISPOSITION DES MICROPHONES

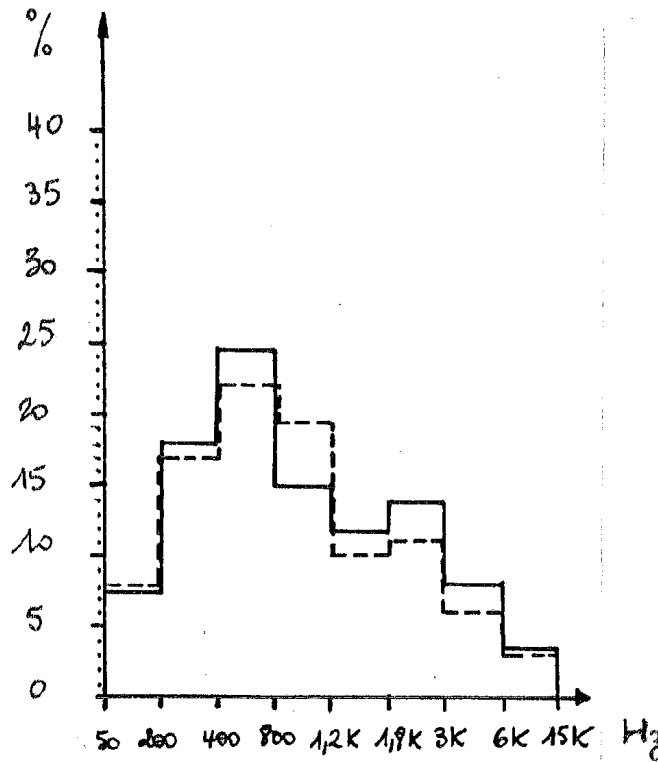
# VIOLON (EXTRAIT 1 POSITION 1)

fig 43

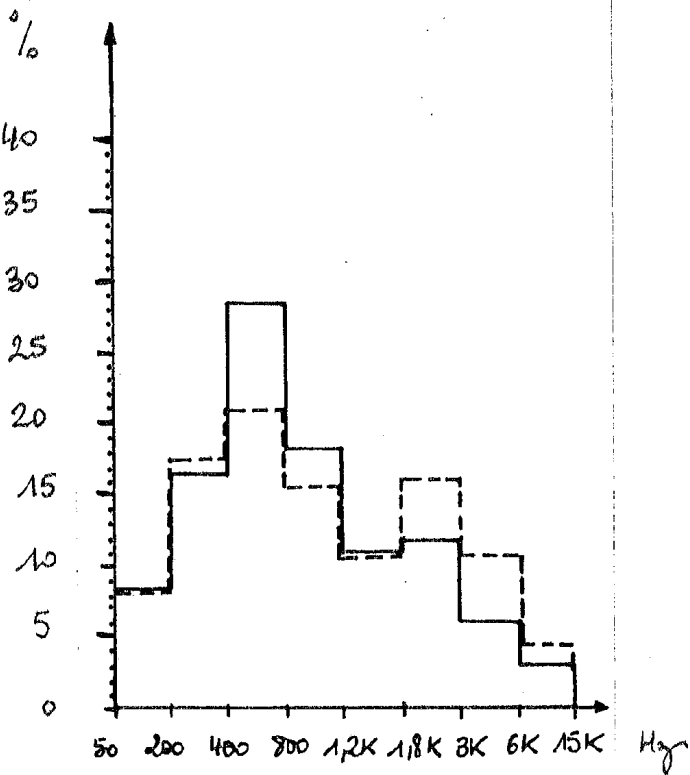
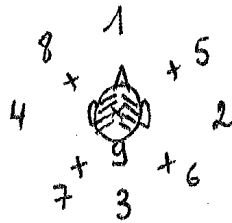
ANALYSE A' U.I.D.S



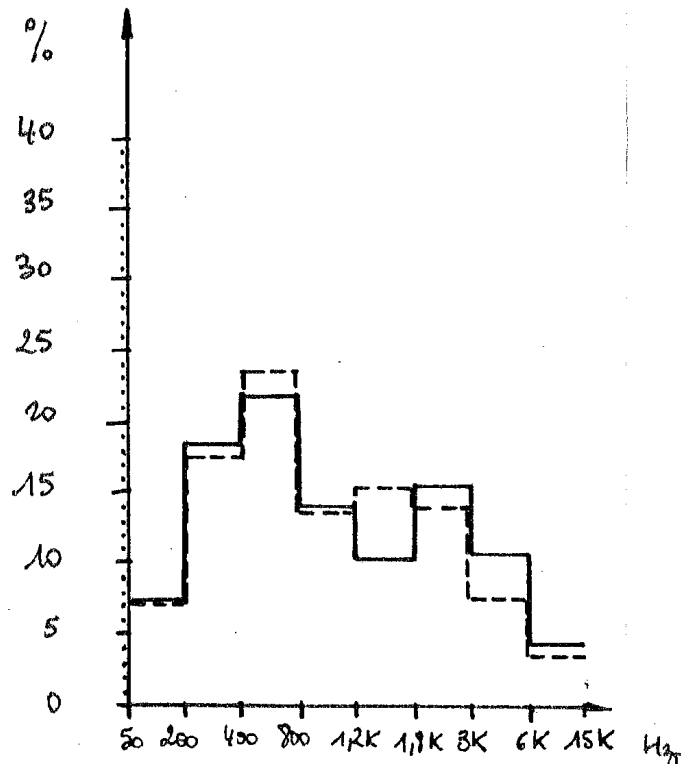
mass  
 ——— 1  
 - - - 3  
 ..... 9



——— 2  
 - - - 4



——— 8  
 - - - 5



——— 6  
 - - - 7

Les courbes 5 et 6 ont encore la même allure.

Par conséquent, mis à part quelques différences pour un ou deux micros et quelques fréquences, on trouve la même allure de directivité pour les deux extraits. La méthode semble donc être justifiée de ce point de vue.

L'analyse à l'IDS semble alors particulièrement intéressante puisqu'elle élimine les problèmes de micros plus forts que d'autres pour ne s'intéresser qu'à la coloration du phénomène. Peut-être allons-nous trouver des raccordements avec des allures des diagrammes de J. Meyer ?

Voici pour les deux extraits les analyses à l'IDS.

#### Commentaires de l'analyse sur l'IDS - position 1 (fig. 43 et 44)

On a confirmation que les micros 5 et 6 sont très semblables, on s'en aperçoit à l'écoute par ailleurs.

pour la bande 50-200 Hz : on a une bonne isotropie, le 3 l'emporte mais son importance diminuera de plus en plus à partir de la bande 800-1200 lorsque les fréquences croîtront. On se rapproche ici des conclusions de J. Meyer.

dans la bande 200-400 Hz : le 3 est nettement au dessus, les autres sont regroupés.

dans la bande 400-800 Hz : le 8 est le plus important, suivi du 4 dans la bande 800-1200 ; dans la bande 1200-1800, les micros 9 et 7 sont identiques à 3-4 % des autres micros, enfin dans les bandes de 1800 à 15 000 Hz, ce sont les micros 5,9,1 qui prennent le dessus.

#### Commentaires sur l'analyse en 1/3 d'octave du violon extrait 1, position 2 (fig. 45)

Ce qui frappe, ce sont les écarts bien moins importants entre les courbes, le 1 restant néanmoins le plus fort. Le champ est tout à fait différent de celui de la position 1. Ainsi pour 1250 Hz, nous n'avons plus de regroupement comme pour la situation précédente.

Voyons dans le détail :

- entre 200 et 400 : le 4 est le plus important et les 8 et 3 ont un minimum relatif pour 315 Hz et 400 Hz respectivement. Tandis que le 8, se joint aux autres dans la bande 400-500, le 3 reste le plus faible pour cette bande de fréquence. Autour de 500 Hz, il semble y avoir une grande isotropie si on exclut les micros 1 et 3. Pour 800 Hz, le 4 a un maximum absolu à 2 dB en dessous du micro 1.

A 1000 Hz, les courbes ont un minimum, les plus faibles sont les 3,2 et 7. Tandis que dans la région 1250-3150 Hz les 9 et 7 sont les plus forts. Dans la région au dessus de 4000 Hz, les micros 8,3,9 sont ceux qui perdent le plus, ceux qui perdent le moins sont le 2 suivi du 5 et 7 à 3 dB.

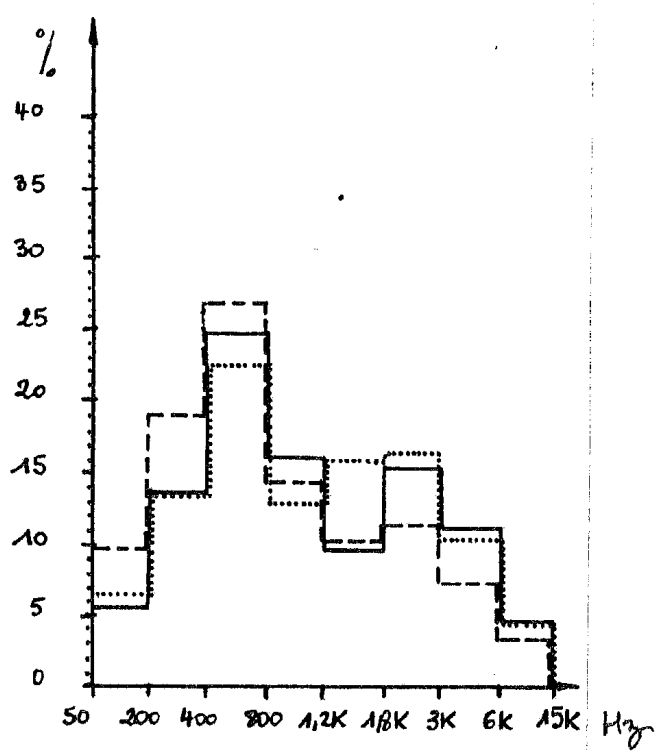
On voit que dans cette situation, il est plus difficile de dégager des directions privilégiées (à part pour le micro 1) car les écarts sont moins creusés. Les diagrammes d'IDS le confirment.

...../

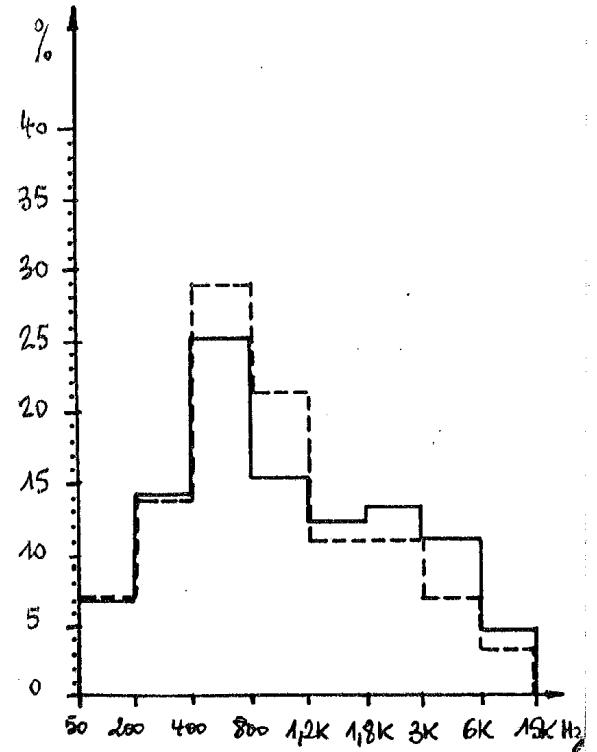
# VIOLON (EXTRAIT 2 POSITION 1)

figure 44

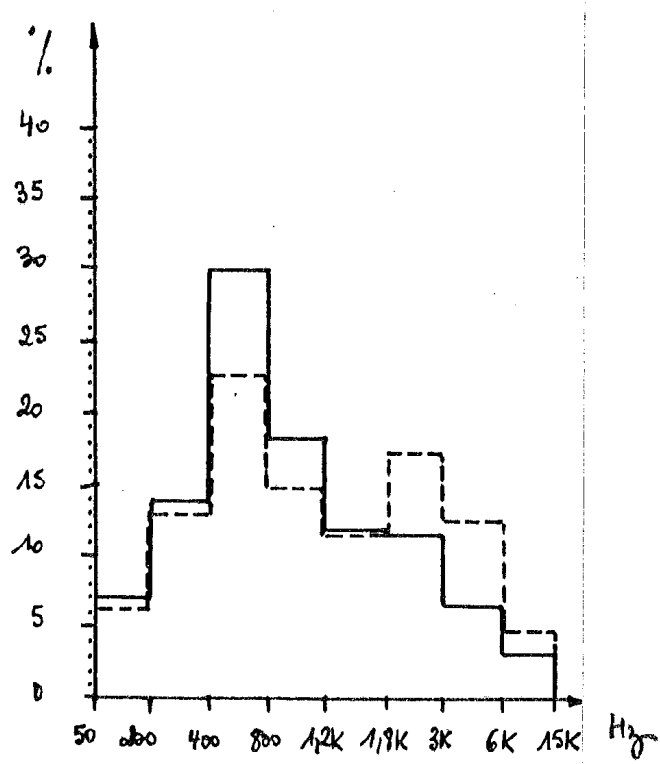
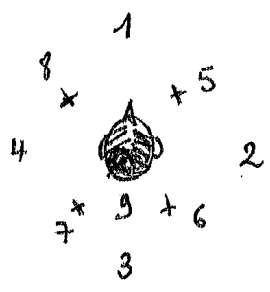
ANALYSE À L'I.D.S



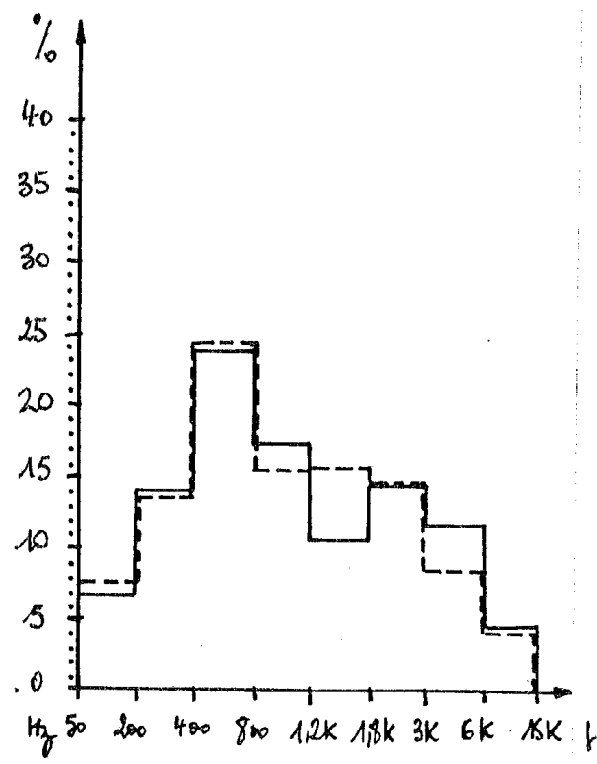
MICROS  
 ——— 1  
 - - - 3  
 ..... 9



— 2  
 - - 4



— 8  
 - - 5



— 6  
 - - 7

dB  
100

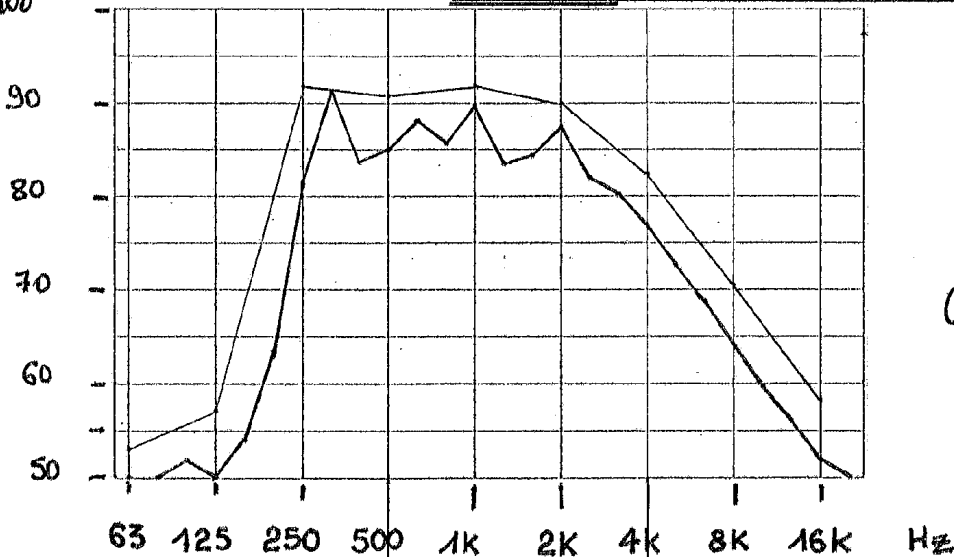
# VIOLON (EXTRAIT 1 POSITION 2)

figure 45

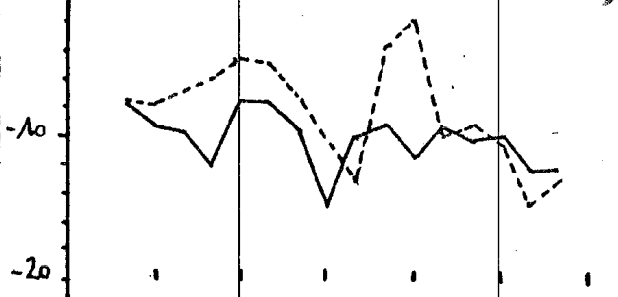
## ANALYSE SPECTRALE

### DU MICROPHONE 1

(octave à 1/3 d'octave)  
L'une est décalée de 5dB  
par rapport à l'autre



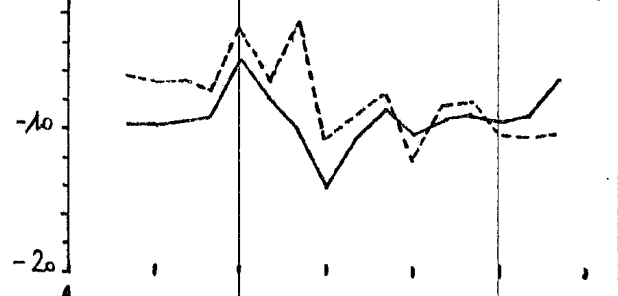
dB  
micro 1



— 3  
- - - 9

### ECARTS DES AUTRES

dB  
micro 1

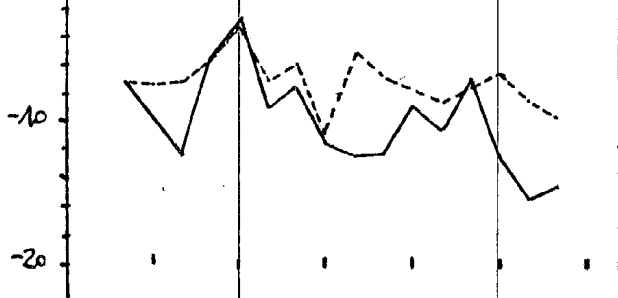


— 2  
- - - 4

### MICROPHONES PAR

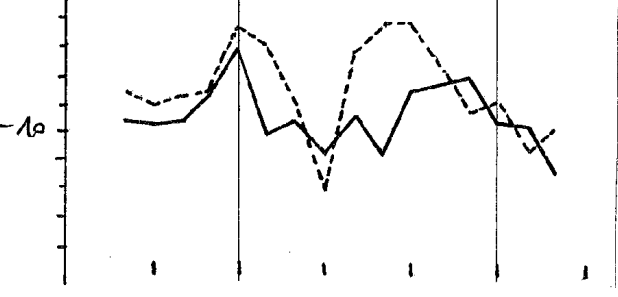
### RAPPORT AU N°1

dB  
micro 1

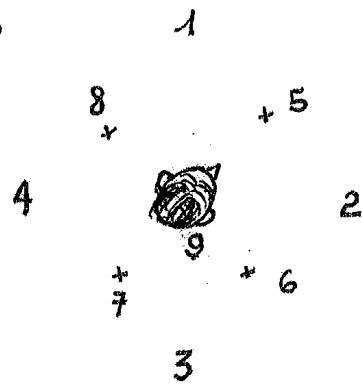


— 8  
- - - 5

dB  
micro 1



— 6  
- - - 7



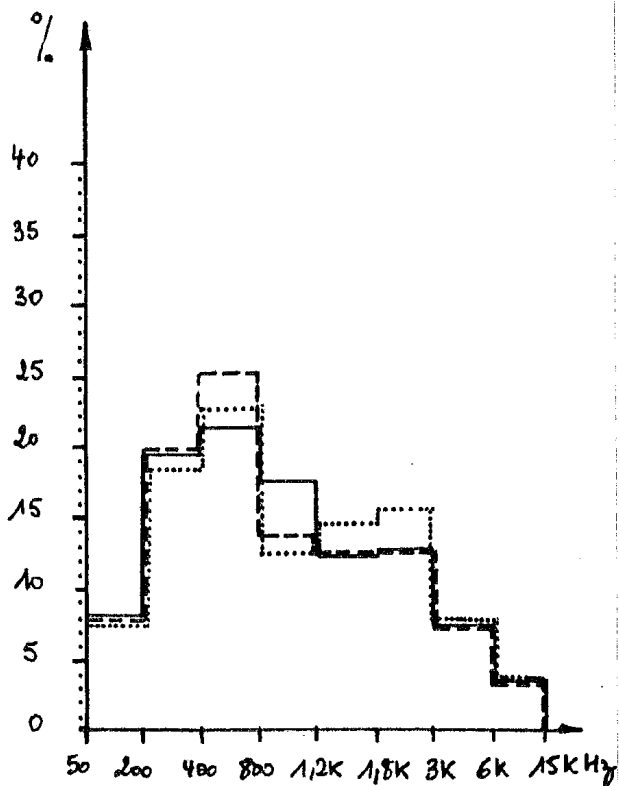
### DISPOSITION DES MICROPHONES



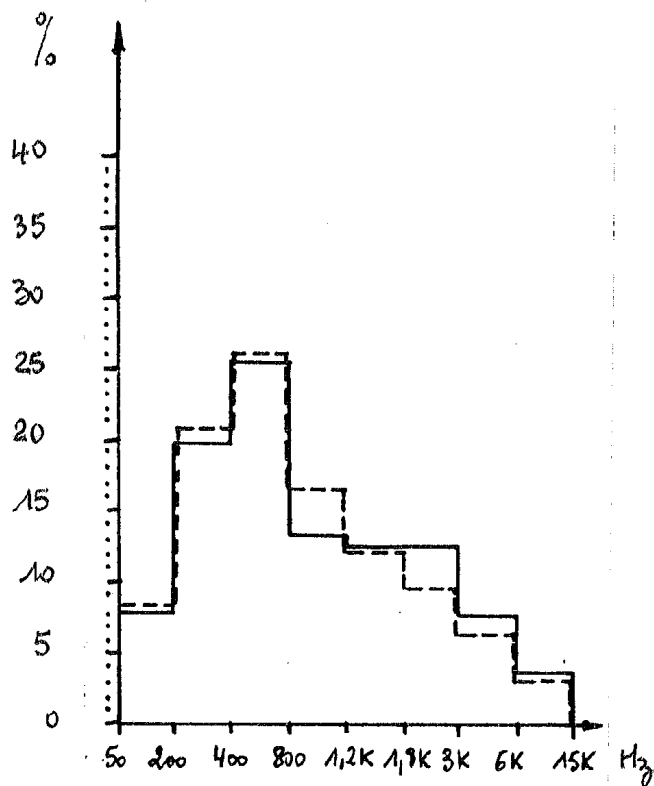
# VIOLON (EXTRAIT 1 POSITION 2)

figure 46

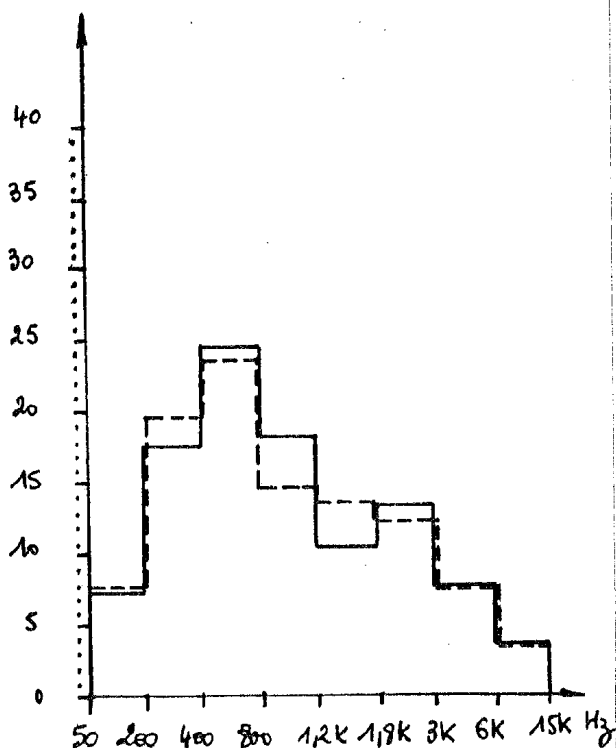
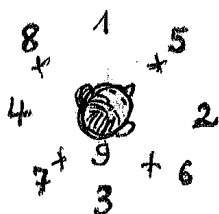
## ANALYSE A L' I.D.S.



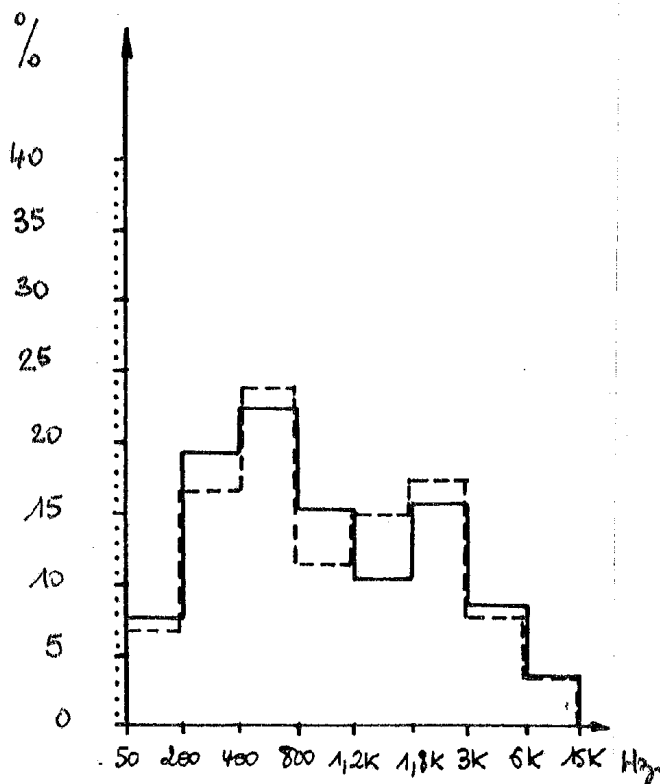
micros  
 ——— 1  
 - - - 3  
 ..... 9



— 2  
 - - 4



— 8  
 - - 5



— 6  
 - - 7

VIOLON

SONAGRAMME DES MICROS 1 & 4

Figure 46 bis

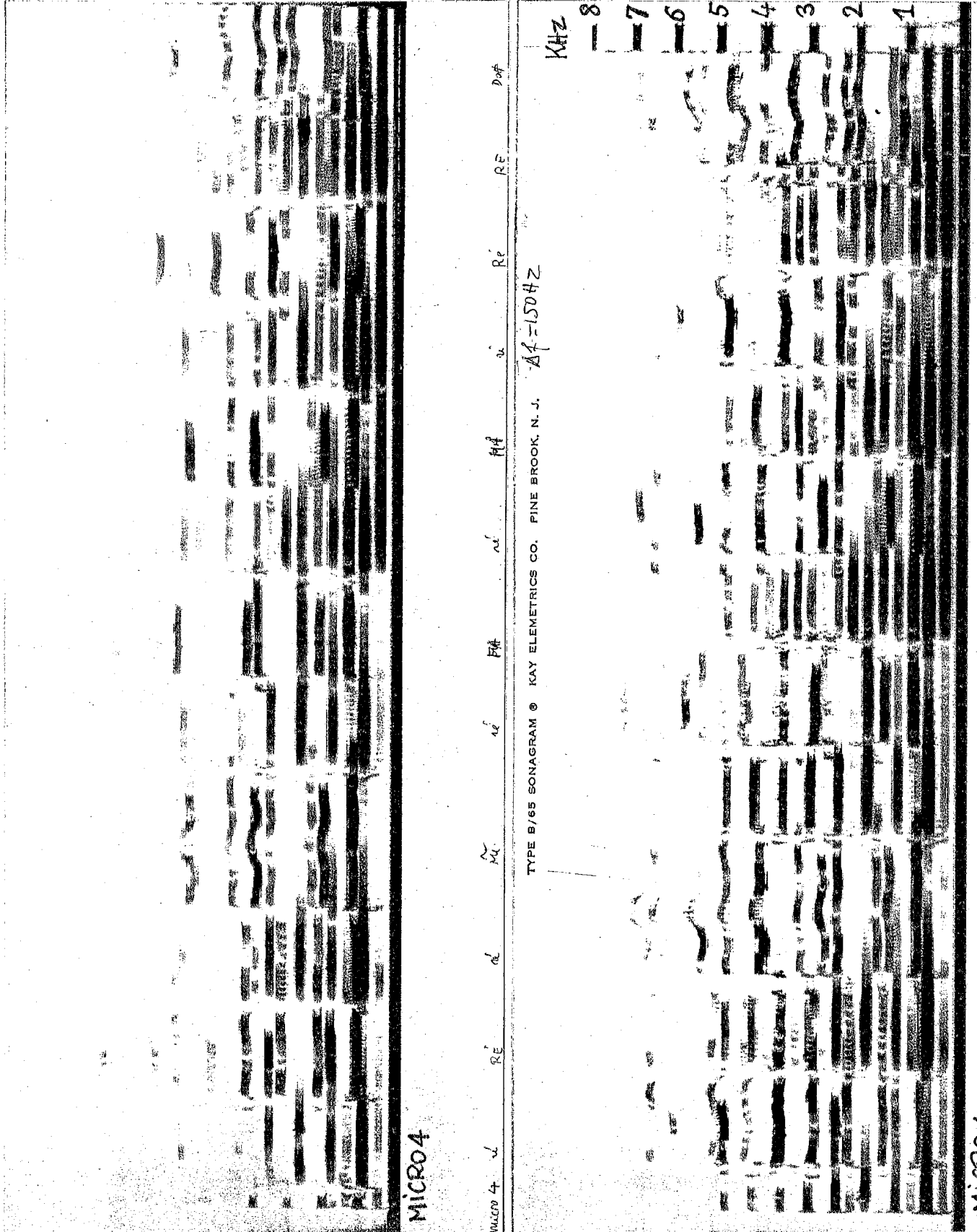


DIAGRAMME IDS CORRESPONDANT (fig.46)

On vérifie que le micro 9 donne les mêmes résultats. Le micro 4 domine dans les régions 50-800 Hz, suivi des 3 et 2. Les micros 7 et 9 l'emportent dans les régions 1200 à 3000 Hz mais sont des plus faibles pour les régions 50-400 Hz et 800-1200 Hz. Les micros 6 et 9 l'emportent après 3000 Hz. Mais ces conclusions sont moins claires que celles pour la première position, car ici les écarts entre le micro le plus fort et son suivant ne dépasse que rarement le 1 %.

On remarque très nettement sur les sonagrammes que les bruits d'attaques présents dans l'enregistrement du micro 1 sont inexistant dans celui du micro 4. Il est clair, par ailleurs, que les aigus sont privilégiés par le micro 1.

3.3. Le trombone

Les enregistrements ont été effectués par Benny Schluchin tromboniste de l'ensemble Intercontemporain. Il a joué une improvisation s'étendant sur tout le registre. La position est celle notée 1 décrite dans le paragraphe sur le violon : le tromboniste est face au micro 1.

Commentaire de l'analyse 1/3 d'octave  
pour le trombone (fig. 47)

C'est le cas le plus facilement interprétable et raccordable aux diagrammes de J. Meyer.

En effet, à part les micros 1 et 3, il y a une bonne isotropie aux basses fréquences, puis l'écart va s'amplifiant vers les hautes fréquences entre les micros de devant et ceux de derrière.

Par ailleurs, les micros symétriques par rapport à l'axe du pavillon donnent des résultats identiques (à 1 ou 2 dB près). Le micro qui perd le plus au dessus de 200 Hz est le 3, ceux qui perdent le moins sont le 8 et le 5.

On note deux maximums relatifs principaux autour de 315 Hz et 630 Hz; celui autour de 315 Hz offre une remarquable isotropie si on exclut le 1 et le 3, tandis que celui autour de 630 Hz est presque inexistant pour les micros 2 et 3.

On semble donc s'accorder, mis à part les micros 1,3 et la position des maximums, avec les conclusions de J. Meyer du point de vue qualitatif.

Les sonagrammes des micros 1 et 3 sur des sons "cuivrés" montrent la grande différence des attaques : très franches du micro 1 et "arrondies" au micro 3 et la perte des harmoniques supérieurs par le micro 3 (fig.48).

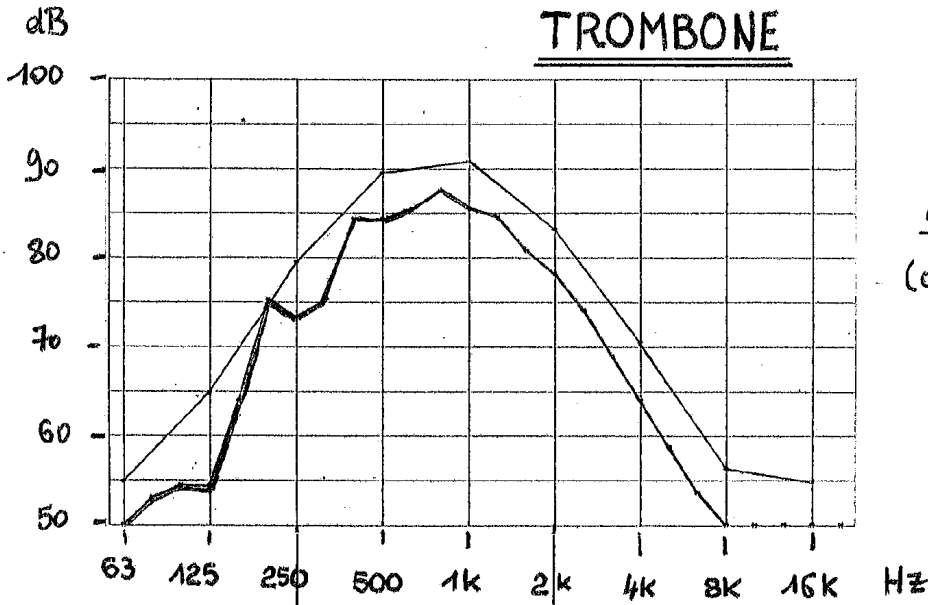
Commentaire des analyses à l'IDS du trombone (fig.49)

Les analyses à l'IDS confirment la grande directionnalité des aigus vers l'avant : le micro 1 domine nettement à partir de 800 Hz, tandis que le 3 est le plus faible.

Pour la bande 50-200 Hz, le 3 l'emporte, dans la bande 200-400 Hz ce sont les 4 et 2 tandis que le 1 est le plus bas et le reste, dans la bande 400-800 Hz où les autres sont assez groupés.

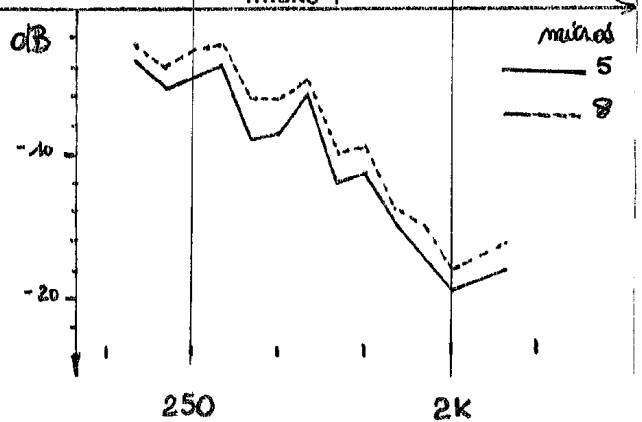
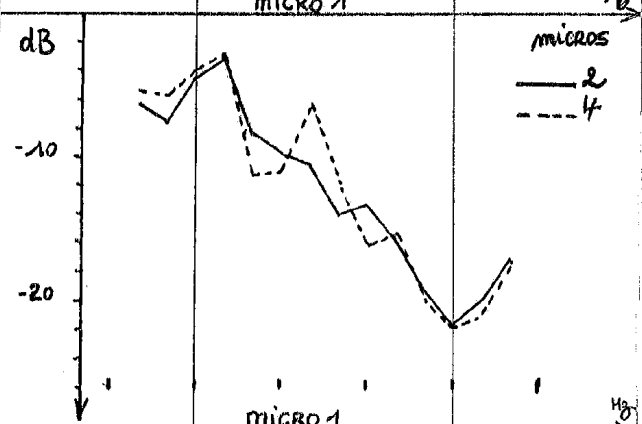
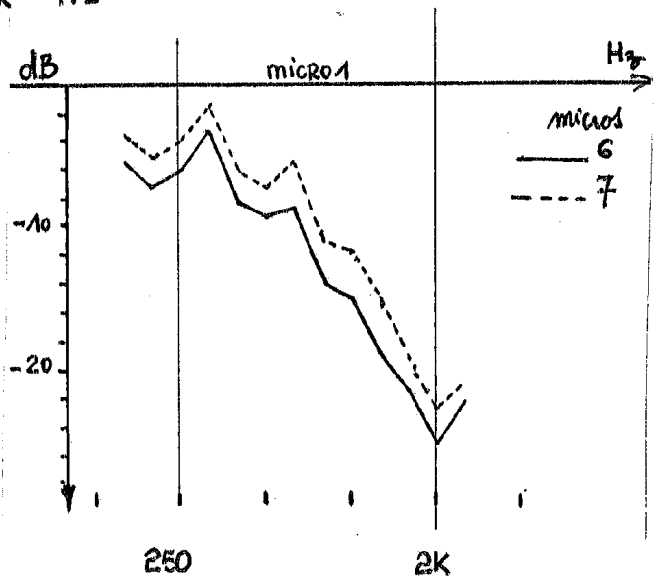
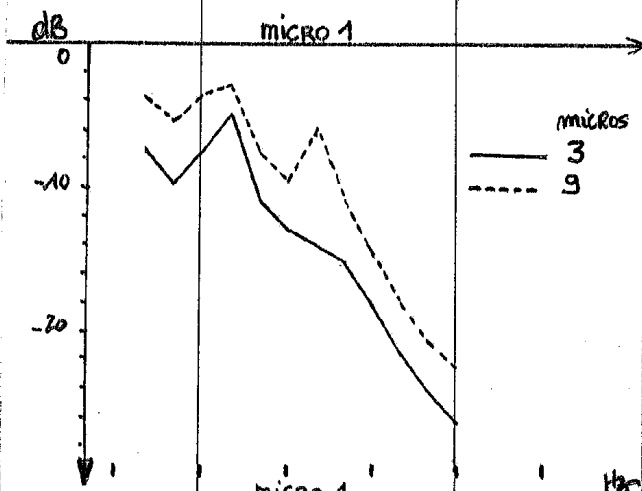
# TROMBONE

figure 47



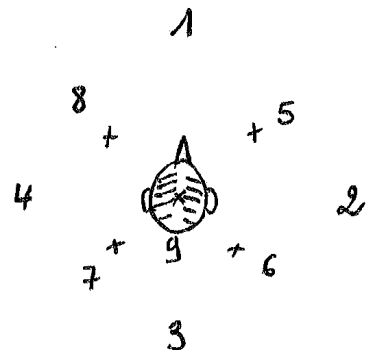
## ANALYSE SPECTRALE DU MICROPHONE 1

(octave  $\times$   $\frac{1}{3}$  d'octave, l'une étant décalée de 5dB par rapport à l'autre)



## ECARTS DES AUTRES MICROPHONES PAR

RAPPORT AU N° 1



DISPOSITION DES MICROPHONES

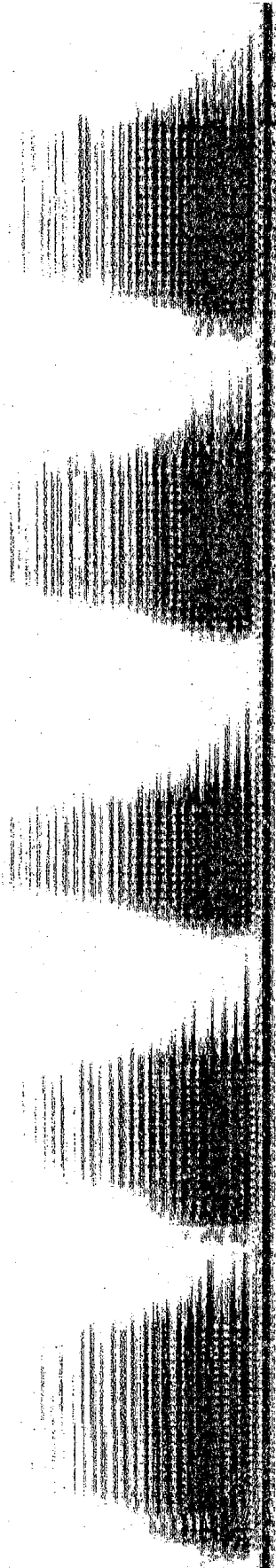
SONAGRAMME

DU TROMBONE

Figure 48

TROMBONE

micro 3



micro 1 TROMBONE



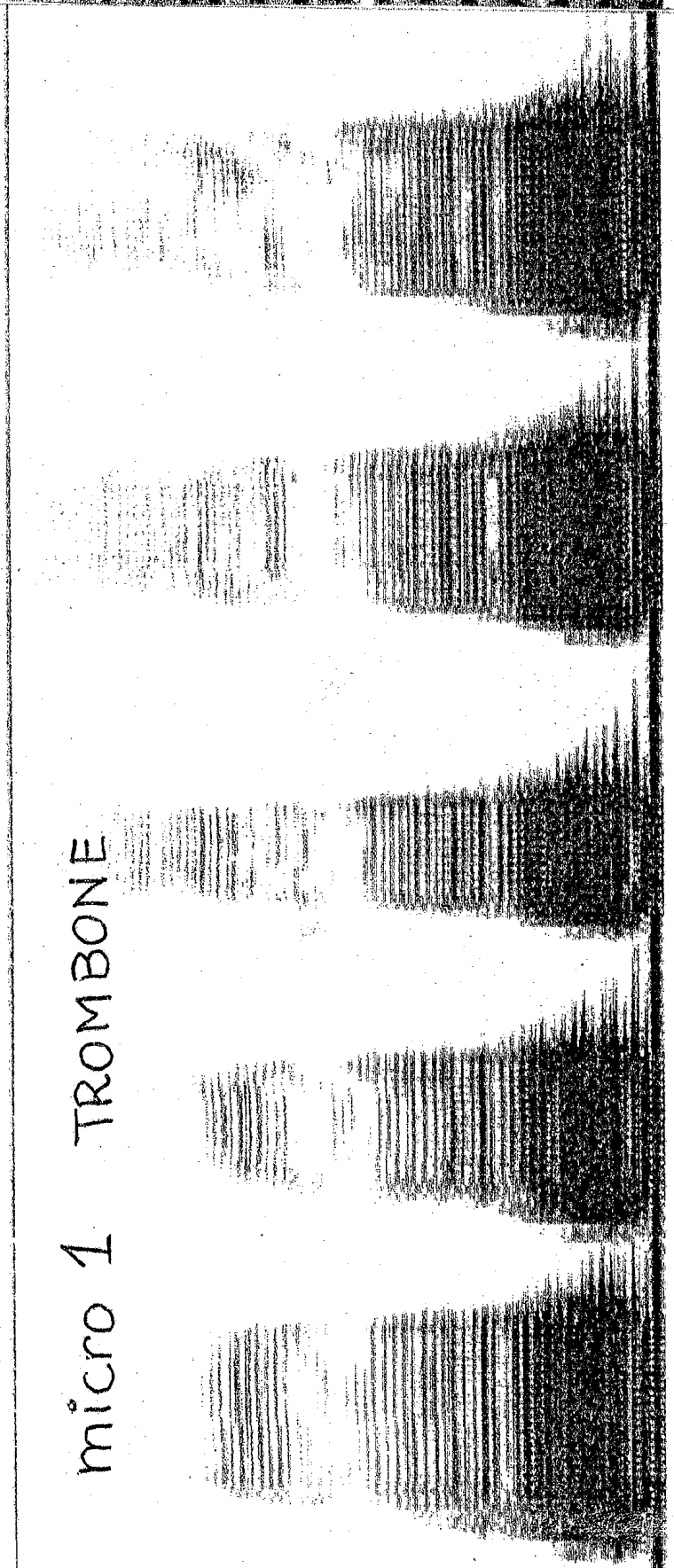
SiB<sub>1</sub>

LA<sub>1</sub>

LAB<sub>1</sub>

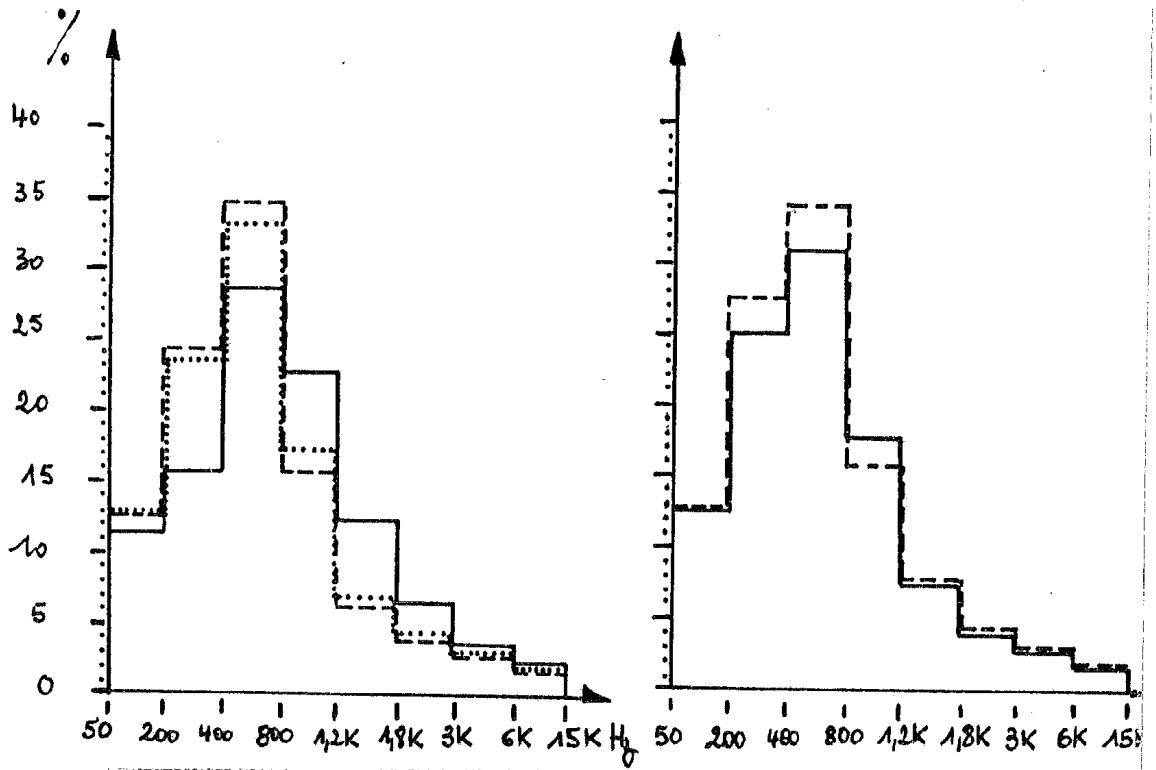
SOL<sub>1</sub>

SOLB<sub>1</sub>



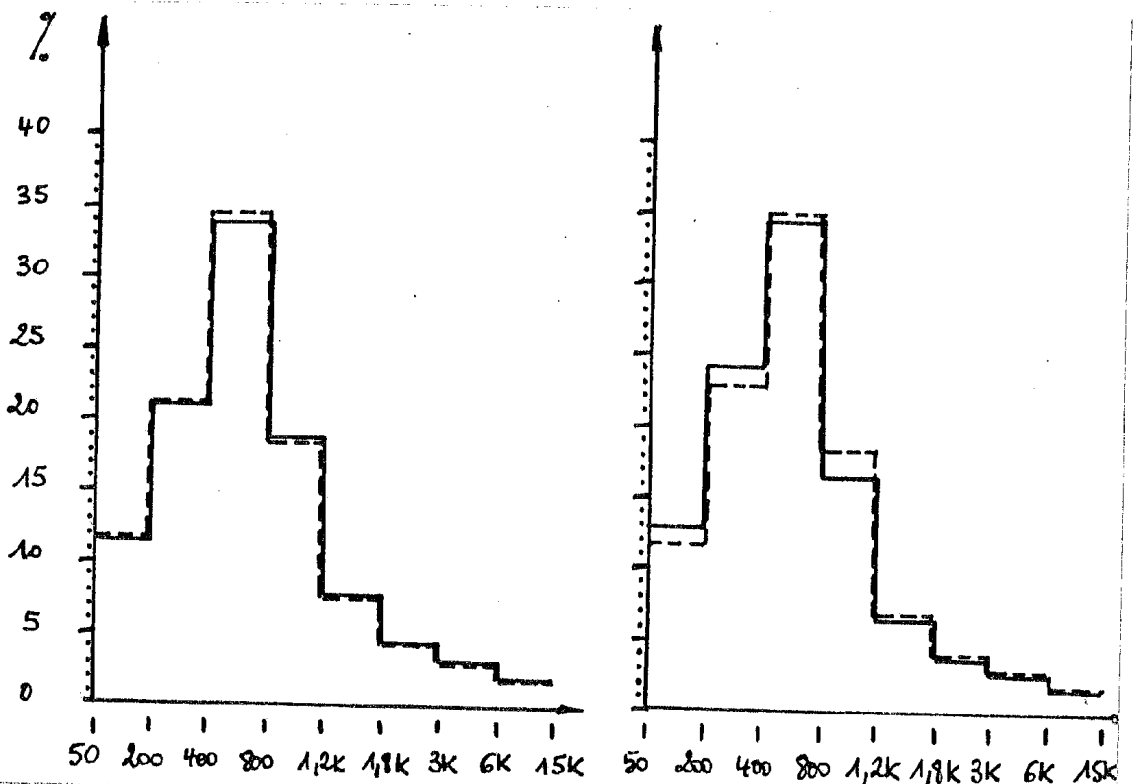
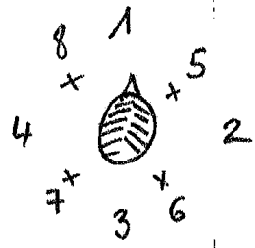
# TROMBONE (IDS)

figure 49



\_\_\_\_\_ 1  
 - - - - - 3  
 ..... 9

\_\_\_\_\_ 2  
 - - - - - 4



\_\_\_\_\_ 8  
 - - - - - 5

\_\_\_\_\_ 6  
 - - - - - 7

### 3.4. La flûte

Les enregistrements ont été effectués par Laurence Beauregard, flûtiste à l'ensemble intercontemporain, il joua Densité 21,5 d'Edgard Varèse (1934) qui explore bien les possibilités de l'instrument. La position est celle notée 1.

Note : la flûte n'était pas en platine !!!

#### Commentaires sur l'analyse en 1/3 d'octave de la flûte

(voir fig. 50)

Ici le micro délivrant le signal le plus fort est le 9 (il peut aller jusqu'à 13 dB au dessus du micro 1) dans les zones 315-1000 Hz et 1600-4000 Hz en dehors, c'est le 1.

A 250 Hz, il y a isotropie mais dès 315 Hz les micros 8,7,4 chutent pour 400-500 Hz, le micro 6 a la même valeur que le 1 puis suit le 5 à 3 dB tandis que les 4 et 2 chutent très fort.

Dans la bande 500-630 Hz, les courbes ont leur maximum absolu centré autour de la valeur du micro 1, les plus forts sont les 2,7,8 ; le plus faible pour 630 Hz est le micro 3.

Il y a une chute dans la bande 630-1000 Hz où les micros 3 et 6 sont les plus faibles, le 2 le plus fort et les autres groupés à 4 dB en dessous.

Dans la bande 1000-1250 Hz, les courbes ont un minimum ; les plus forts sont les 1,2,8. Ensuite le micro 3 restera le plus faible.

Dans la bande 1250-2000 Hz, les 2 et 8 restent les plus forts (ils ont la même valeur que le 9). Les autres resteront très proches de la courbe 3 après 2000 Hz.

Pour 3150 Hz, le micro 2 a un maximum à 3-4 dB au dessus du micro 1.

Ici, on semble se rapprocher des conclusions de J. Meyer. Surtout pour la directivité privilégiée dans l'axe de la flûte après 2000 Hz, l'omnidirectionnalité aux basses fréquences et la perte pour le micro 1 entre 630 et 800 Hz.

#### Commentaires de l'analyse sur l'IDS

(voir fig. 51)

Les micros 6 et 3 l'emportent de 50 à 400 Hz, puis le 7 pour 400 à 800 Hz ; le 8 domine nettement dans la bande 1200-1800 Hz ; le 4 dans la bande 1800-3000 et le 3 dans la bande 3000-6000, enfin les 8 et 4 dans la bande 6000 à 15000 Hz. Ainsi, l'enregistrement du 4 manque de graves, en effet c'est ce micro qui prend le moins jusqu'à 800 Hz. Le micro 9 lui, a un trou dans la bande 1200-1800 Hz. Le micro 7 a peu d'aigus

Dans le cas de la flûte, les rapports entre les micros varient assez d'une bande à l'autre.

Les sonagrammes sont ceux des micros 1 et 2 pour la mesure 12 de densité 21,5. Les bruits de souffle présents au début du sonagramme du micro 1 ont disparu sur celui du micro 2 (fig.52).

...../

# FLUTE

## ANALYSE SPECTRALE DU MICROPHONE

N°1 en octave & 1/3 d'octave  
(l'une est décalée de 5dB par rapport à l'autre)

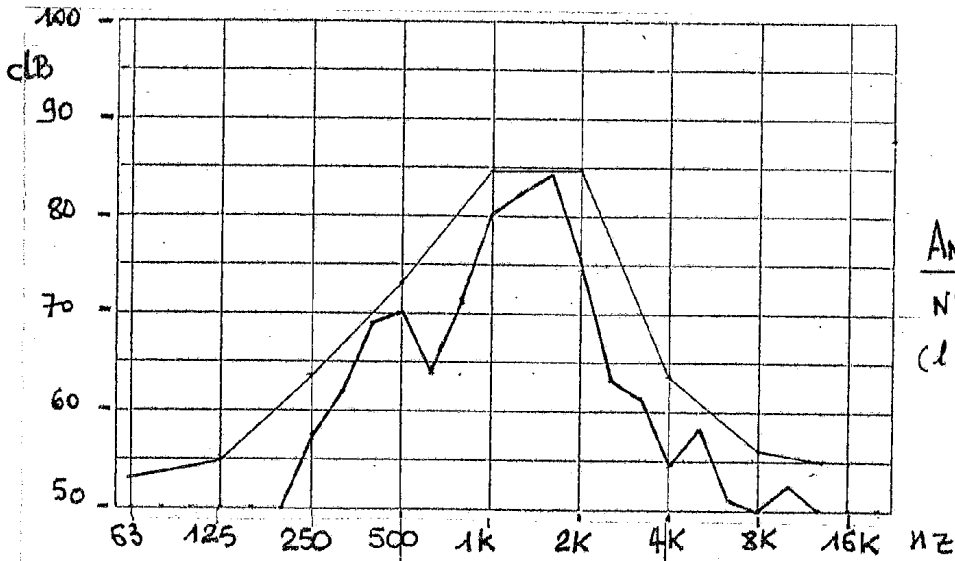
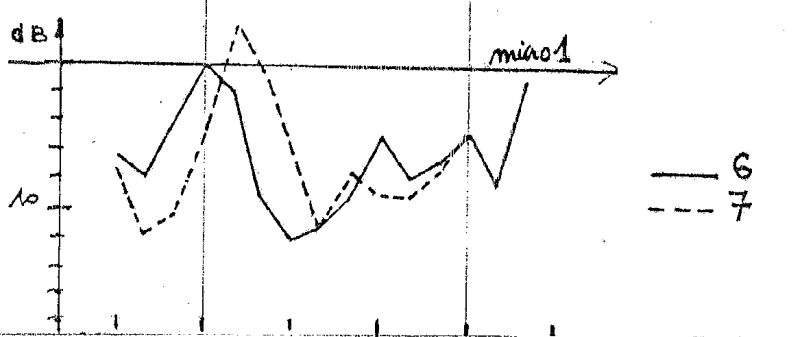
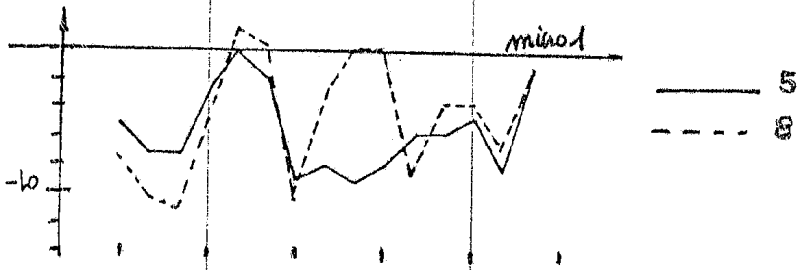
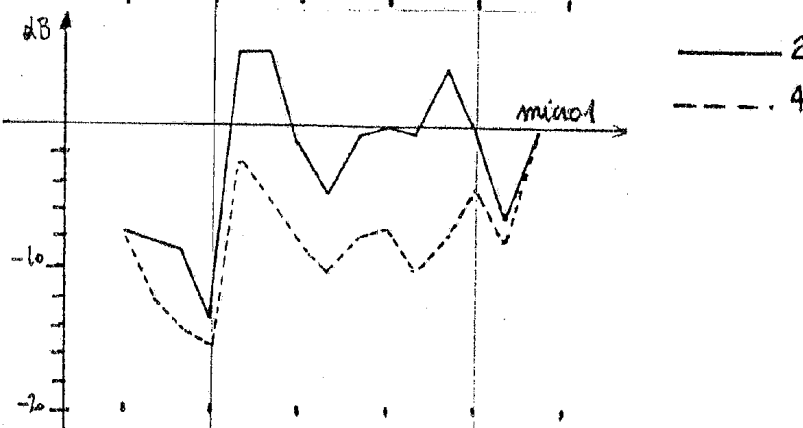
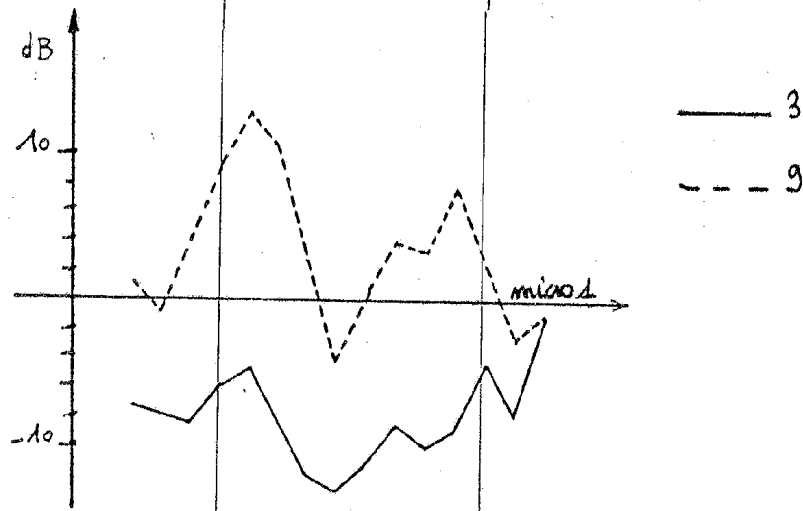
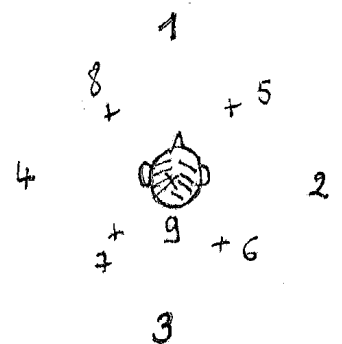


figure 50



## ECARTS DES AUTRES

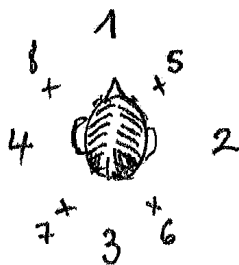
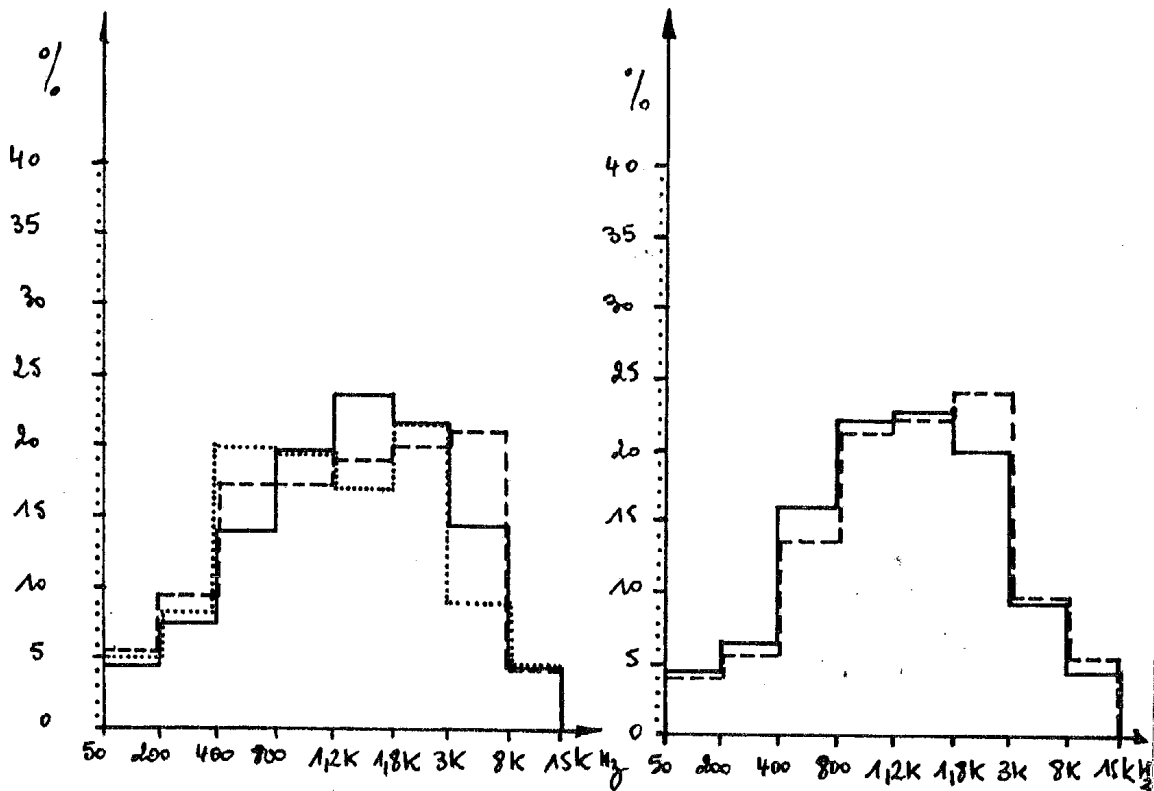
MICROPHONES PAR  
RAPPORT AU N°1



## DISPOSITION DES MICROPHONES

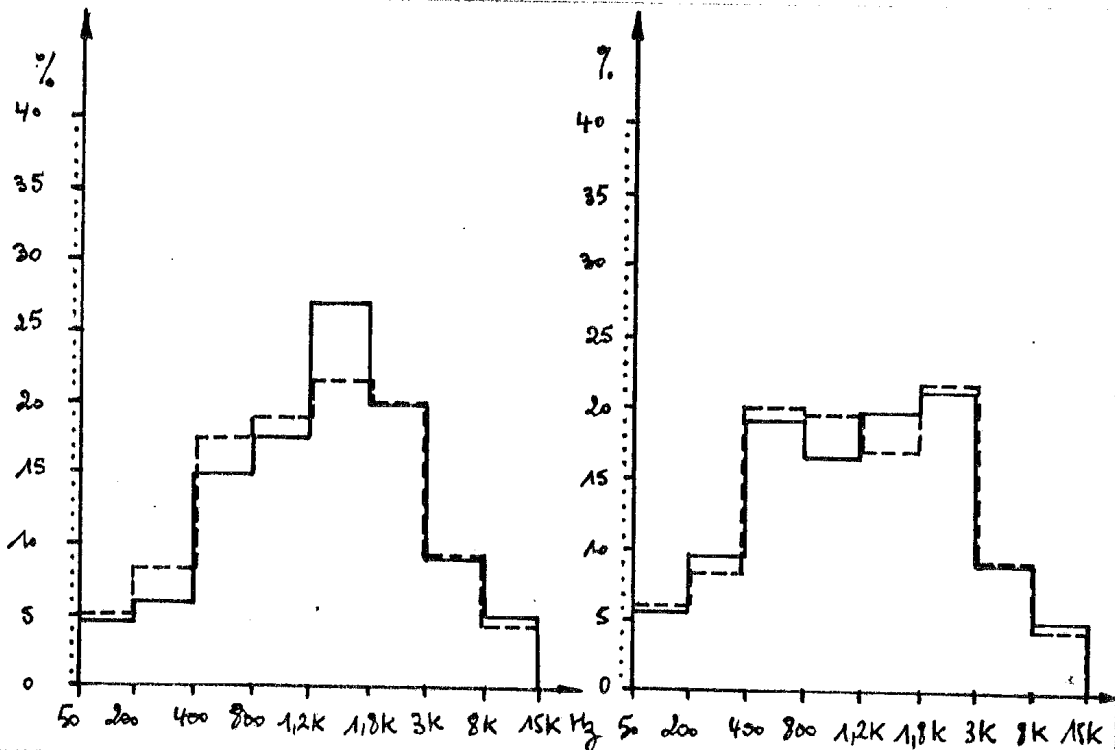


# FLUTE (IDS) Figure 51



- 1
- - - 3
- ⋯ 9

- 2
- - - 4



- 8
- - - 5

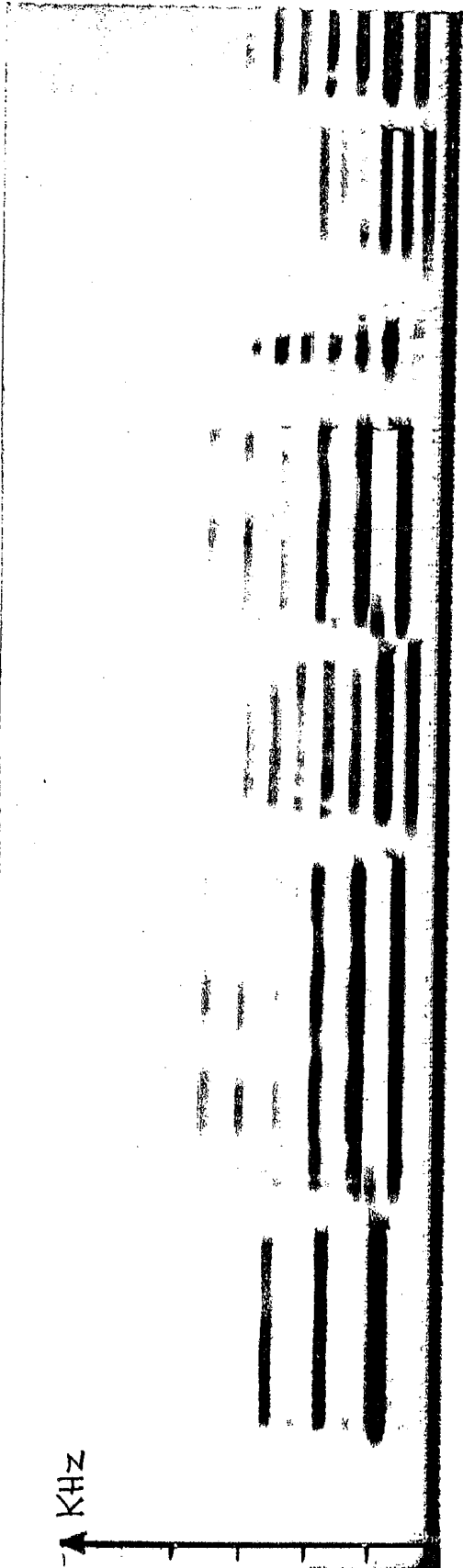
- 6
- - - 7

FLUTE

SONAGRAMMES

figure 52

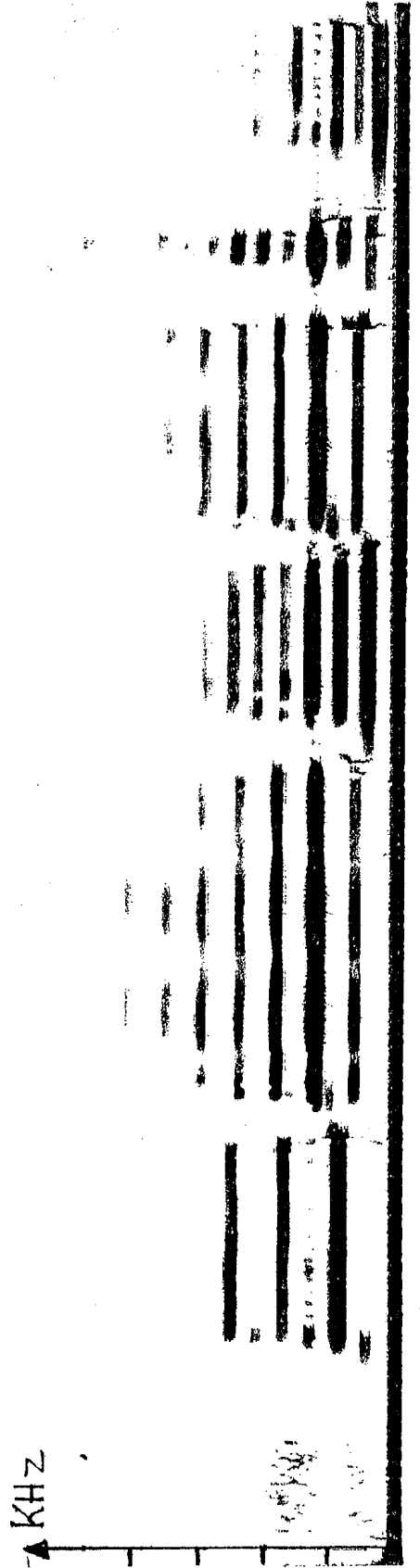
micro 2



micro 1



TYPE B/65 SONAGRAM © KAY ELECTRONICS CO. PINE BROOK, N. J.



### 3.5. La Guitare

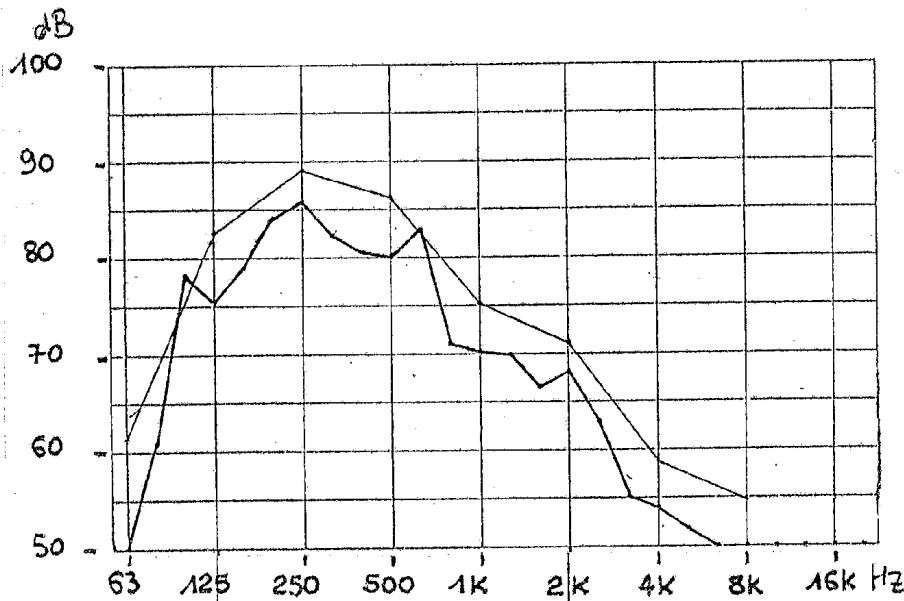
Le micro 1 est toujours celui dont le niveau est le plus élevé et ceci pour toutes les fréquences. En ce qui concerne les fréquences en dessous de 500 Hz les autres micros sont de niveaux comparables tandis que les fréquences autour de 1 KHz, 2 KHz sont privilégiées par les micros 2,8 suivis des 4 et 5. Enfin les micros 6,3 et 4,7 sont ceux qui accusent le plus grand trou autour de 500 Hz.

### CONCLUSION

Il apparait à l'issue de ce bulletin que le problème de la directionnalité des instruments de musique est complexe. Peut-être est ce la raison pour laquelle un sujet si important a été si peu abordé ?

Dans la méthode exposée nous avons pris le parti de faire jouer les instruments par des musiciens. Nous pensons y gagner en réalisme, quitte à renoncer à une certaine précision.

Il reste le problème essentiel : relier les résultats des analyses avec ce que l'on entend effectivement même si les différences les plus marquées sont révélées par l'analyse en fréquence. L'analyse par sonagramme peut offrir par ailleurs de précieux renseignements. Nous touchons ici aux questions d'acoustique physiologique et aux facteurs liés à la perception de la directionnalité d'un instrument; perception qui d'ailleurs est binaurale. D'autre part, nous l'avons vu les résultats varient beaucoup en fonction des petites variations angulaires et, en général, les extrapolations au cas d'un instrument ou d'un groupe d'instruments placé dans une salle semblent délicates.



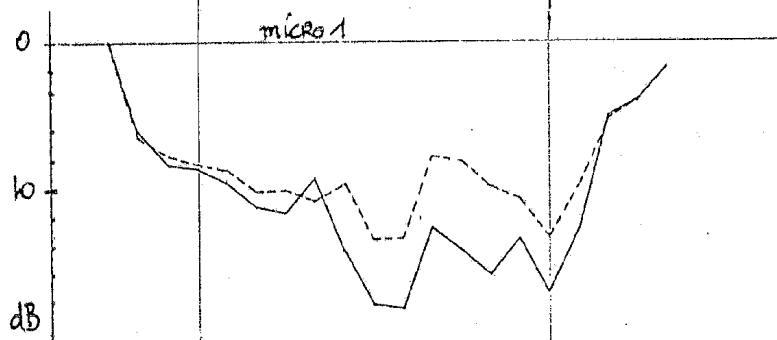
# GUIWARE

Figure 53

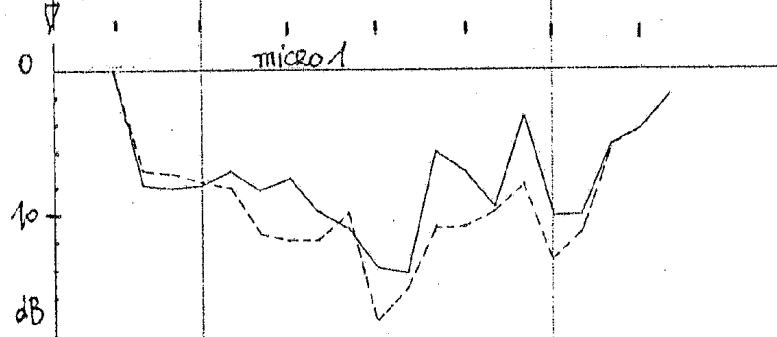
ANALYSE SPECTRALE

DU MICROPHONE 1

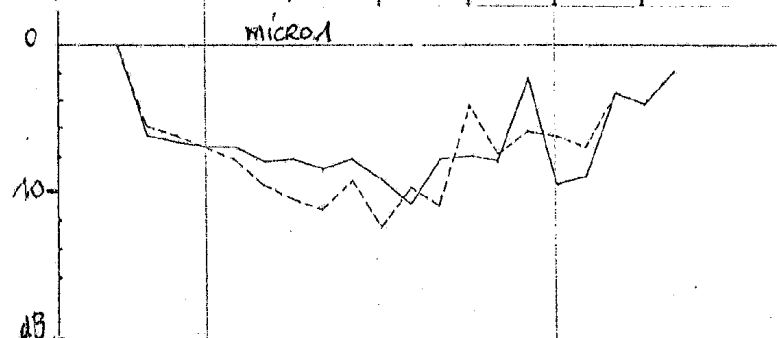
(octave & 1/3 d'octave, l'un est décalé de 5dB par rapport à l'autre.)



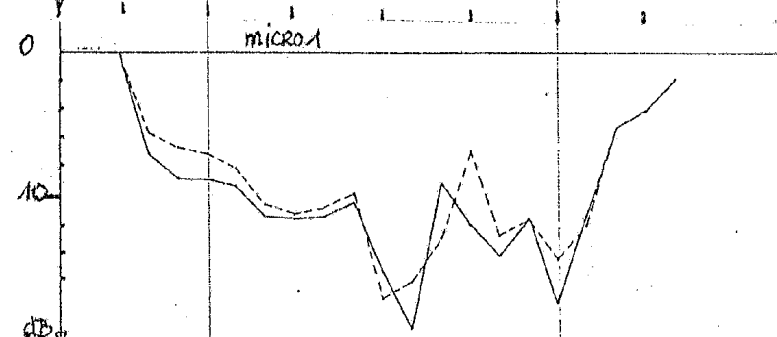
— 3  
- - - 9



— 2  
- - - 4



— 8  
- - - 5

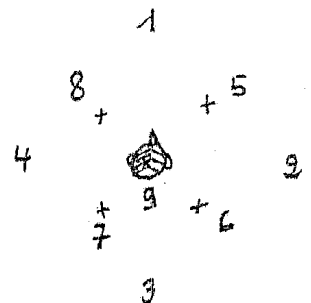


— 6  
- - - 7

ECARTS DES AUTRES

MICROPHONES PAR

RAPPORT AU N°1



DISPOSITION DES MICROPHONES

BIBLIOGRAPHIE

- I - 1. - Pour les orchestres baroques, la référence est le livre de QUANTZ (1752). Essai d'une méthode pour apprendre à jouer la flûte traversière... fac simulé édition Zurfluh, Paris 1975  
et l'article de S. KUIJKEN et J. LEQUEUX paru dans "La Recherche" de juillet (1981).
- Pour une histoire des orchestres, on puisera dans THE ORCHESTRA a history by Henry RAYNOR - London Robert Hale limited, et à l'article ORCHESTRA dans le New Grove dictionary.
- Les extraits de BERLIOZ sont tirés de son célèbre Traité d'Orchestration (1844) - Réédition fac-similé H. Lemoine.  
Sir Adrian BOULT dans son "A handbook on the technique of conducting" Paterson's publication LTD (1968) nous livre ses opinions sur la disposition des musiciens de l'orchestre.
- Pour les dispositions "allemandes" et "américaines" je me suis référé à J. MEYER : "Acoustics and Performance of Music"; Verlag das Musikinstrument, Frankfurt am Main (1978), qui propose de nombreux exemples musicaux sur les avantages des différentes dispositions.  
Le texte de STOCKHAUSEN est tiré de ses Conversations avec Jonathan COTT paru chez Robert Lattés (1979).  
Le texte de BOULEZ est extrait de sa conférence d'introduction à la table ronde "Musique Contemporaine" XI° ICA, Paris (1983).

2. On trouvera des développements de ce qui fut présenté dans

- L.L. BERANEK - Acoustics. Mc Graw-Hill (1954)
- J. BERNHART - Traité de prise de son. Eyrolles (1949)
- M. BRUNEAU - Cours polycopié d'acoustique physique du D.E.A. d'acoustique appliquée du Mans (1983).
- C. CEOEN - La prise de son  
Bulletin du G.A.M. N° 65 (1973)
- J. KERGOMARD - Cours polycopié d'électroacoustique du D.E.A. d'Acoustique du Mans (1983).
- H.F. OLSON - Acoustical Engineering. Van Nostrand (1957)

II - Les articles cités dans le texte sont les suivants :

- Y. ANDO - On the Sound Radiation from semi-infinite circular pipe of certain wall thickness.  
Acustica, vol. 22, (1969/70) p. 219-225.

BIBLIOGRAPHIE (suite)

- Y. ANDO - Experimental Study of the pressure directivity and the acoustic centre of the circular pipe horn loud speaker  
Acustica, vol. 20, (1968), p. 366-369
- J. KERGOMARD - Champ interne et champ externe des instruments de musique.  
Thèse Université PARIS VI (1981)
- J. KERGOMARD - Le rôle du tuyau dans le timbre de certains instruments à trous latéraux.  
Rapport du IX<sup>e</sup> Congrès d'Acoustique, Madrid (1977)
- J. KERGOMARD - La prise de son : le cas des instruments à vent.  
l'Audiophile, n° 4, Avril (1978).
- J. KERGOMARD - Instruments à vent à trous latéraux : étude théorique du rayonnement et pertes viscothermiques.  
C.R. du XI<sup>e</sup> ICA., Paris (Juillet 1983)
- P.A. NORTHROP - Problems in the analysis of the tone of an open pipe  
JASA, vol 12 (juillet 1940), p. 90-94.
- F. WU et P. PERIO - La phase en acoustique musicale :  
II le rayonnement des instruments à vent.  
in le journal de physique, 42 (mai 81) p. 627-633.
- III - A.H. BENAËDE - Sound generation in winds, strings and computer  
Royal Swedish Academy, n° 29, (1980).
- R. CAUSSE - Les sourdines du trombone :  
bulletin du G.A.M., à paraître.
- A. GARCIA - Méthode d'étude de la directionnalité des instruments de musique au sein d'un orchestre.  
Rapport de stage de D.E.A., le Mans (Octobre 1982).
- E. JANSSON - Tone characteristics of violin  
STM. Swedish Journal of Musicology, vol 60 (1/1978).
- E. LEIPP - L'intégrateur de densité spectrale - (IDS)  
Bulletin du G.A.M. N° 94, Paris, (1977).
- D.W. MARTIN - Directivity and the acoustic spectra of brass wind instruments.  
JASA, vol. 13, (Janvier 1942), p. 309-313.
- J. MEYER - Le pouvoir directionnel des instruments de musique.  
Bulletin du G.A.M. N° 27, (mars 1967).
- J. MEYER - La disposition des musiciens dans l'orchestre en fonction de la directionnalité des instruments.  
Bulletin du G.A.M. N° 48 (mai 1970)
- J. MEYER - Acoustics and performance of music  
Verlag des Musikinstrument, Frankfurt am Main, (1978).

BIBLIOGRAPHIE (Suite)

- C. THFOIN - La directionnalité des instruments de musique  
in colloque du CNRS "qualité acoustique des lieux  
d'écoute" - ERA 537, PARIS (Octobre 1981).
- C. THFOIN - Conférences des journées d'études du Festival du Son  
Paris (1983).
-