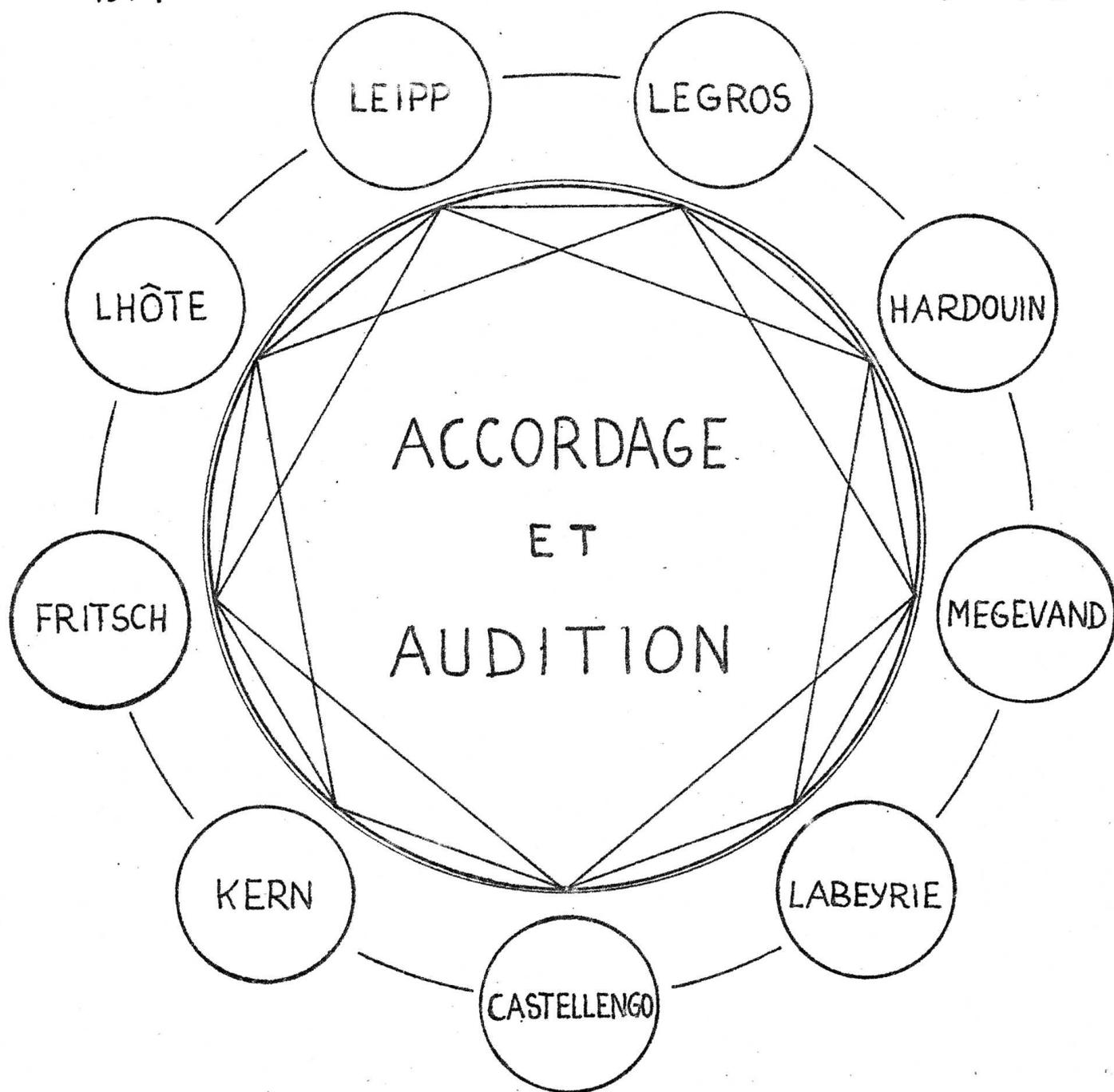


DECEMBRE
1974

N°76



GAM

BULLETIN DU GROUPE d'ACOUSTIQUE MUSICALE
UNIVERSITÉ PARIS VI - TOUR 66 - 4 PLACE JUSSIEU. PARIS 5^e.

UN PROBLEME DE PERCEPTION DE LA HAUTEUR DANS L'AIGU ET LE SURAIGU

EXPERIENCE SUR LA JUSTESSE DES OCTAVES MELODIQUES

par M. CASTELLENGO

1. POSITION DU PROBLEME

La nécessité d'une expérimentation sur la perception des intervalles entre deux sons successifs aigus est apparue au cours de l'étude de la justesse des flûtes. Nous entendons par " aigus " les sons supérieurs à DO5, soit environ 1000 Hz. Du point de vue instrumental ceci correspond à la 3ème octave de la flûte traversière, aux 2 dernières octaves du piccolo et aux 2 dernières octaves du piano.

En pratique les fondamentaux des instruments de musique plafonnent vers 4000 Hz, y compris les fournitures de l'orgue classique : la 9ème rangée de la cymbale donnée en exemple par Dom BEDOS (l'Art du Facteur d'Orgues, planche 17) ne dépasse pas la touche 63 d'un 4' soit Ré7 = 4700 Hz.

Nous verrons que cette limite pratique semble bien correspondre à une borne physiologique pour un certain nombre de sujets.

2. CHAMP DE LIBERTE DES HAUTEURS D'UNE FLUTE. JUSTESSE D'UNE FLUTE.

On sait que les flûtes ne sont pas des instruments à sons fixes : selon le type d'embouchure, le flûtiste peut régler la hauteur d'une même note de diverses façons (pression, recouvrement de l'embouchure etc...). Pour tester la justesse d'un instrument on procède de la façon suivante. On demande au musicien de jouer une certaine note de son instrument puis d'en modifier la hauteur en plus et en moins tout en restant dans des limites de timbre acceptables. On mesure alors le minimum et le maximum puis on passe à la note suivante. On obtient pour finir un diagramme représentant le " champ du possible " du musicien. Les résultats s'expriment en fonction d'une référence qui est habituellement la gamme tempérée égale, base LA3 = 440 Hz.

Nous avons fait un grand nombre de ces relevés tant sur des flûtes traversières que sur des flûtes à bec et nous avons constaté le fait suivant : pour nombre d'instruments, les notes de la dernière octave ont tendance à être d'autant plus hautes que leur fréquence est plus élevée. Si l'on considère qu'un instrument est juste lorsqu'on peut tracer une horizontale à travers le champ de liberté, la plupart des flûtes seraient donc fausses ! En effet, la ligne moyenne est plutôt une courbe ascendante. Comme on peut s'en rendre compte en examinant les 4 relevés de la figure 1. Si les flûtes que nous avons étudiées sont considérées comme justes par les musiciens qui les utilisent, nous devons mettre en doute les mesures physiques et les " corriger " en fonction des propriétés particulières du système auditif pour la perception des sons aigus. Nous avons donc entrepris une série d'expériences dans ce but, mais avant d'en rendre compte nous allons faire état des travaux antérieurs.

Voir
fig 1.

...../

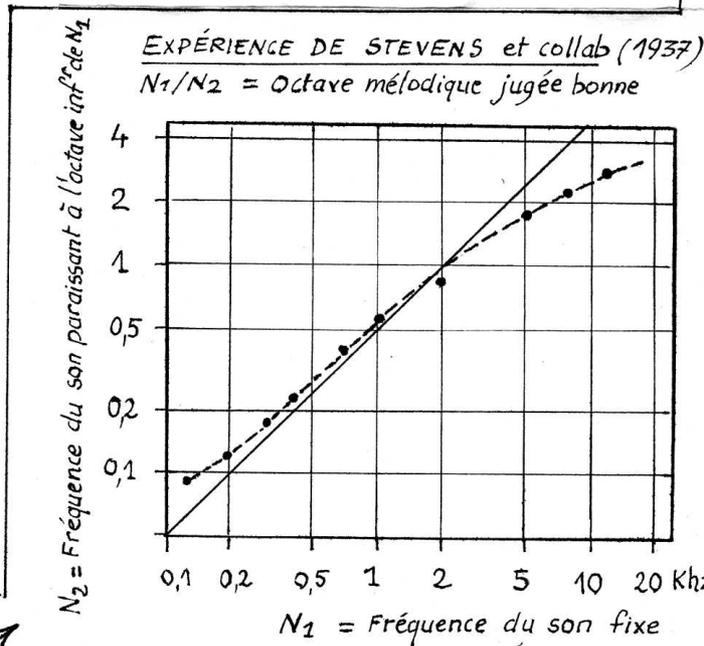
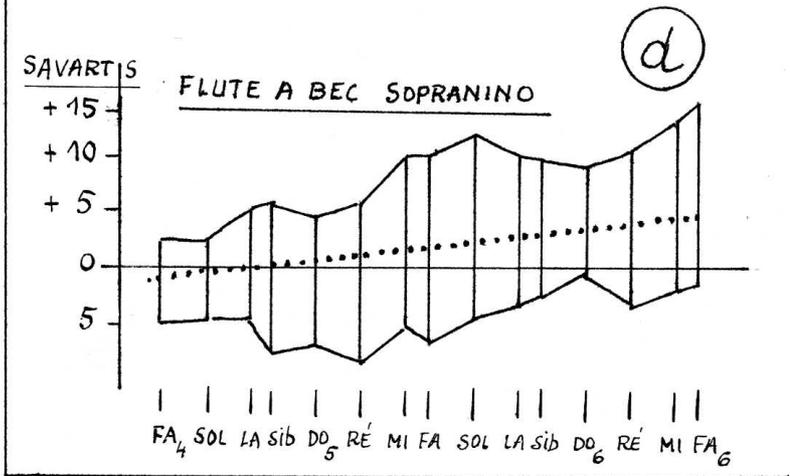
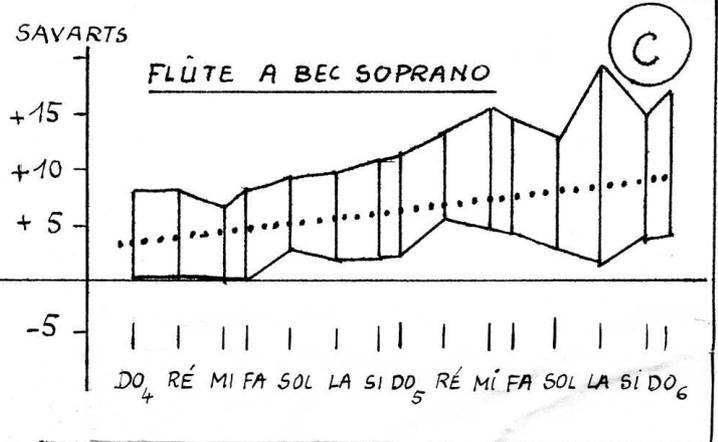
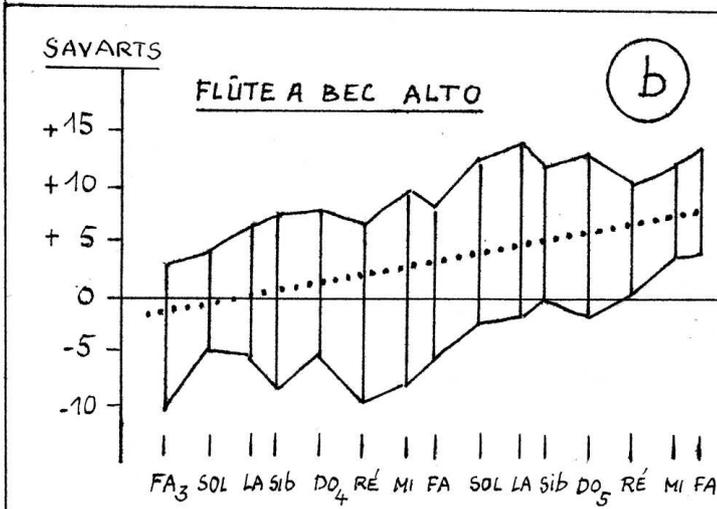
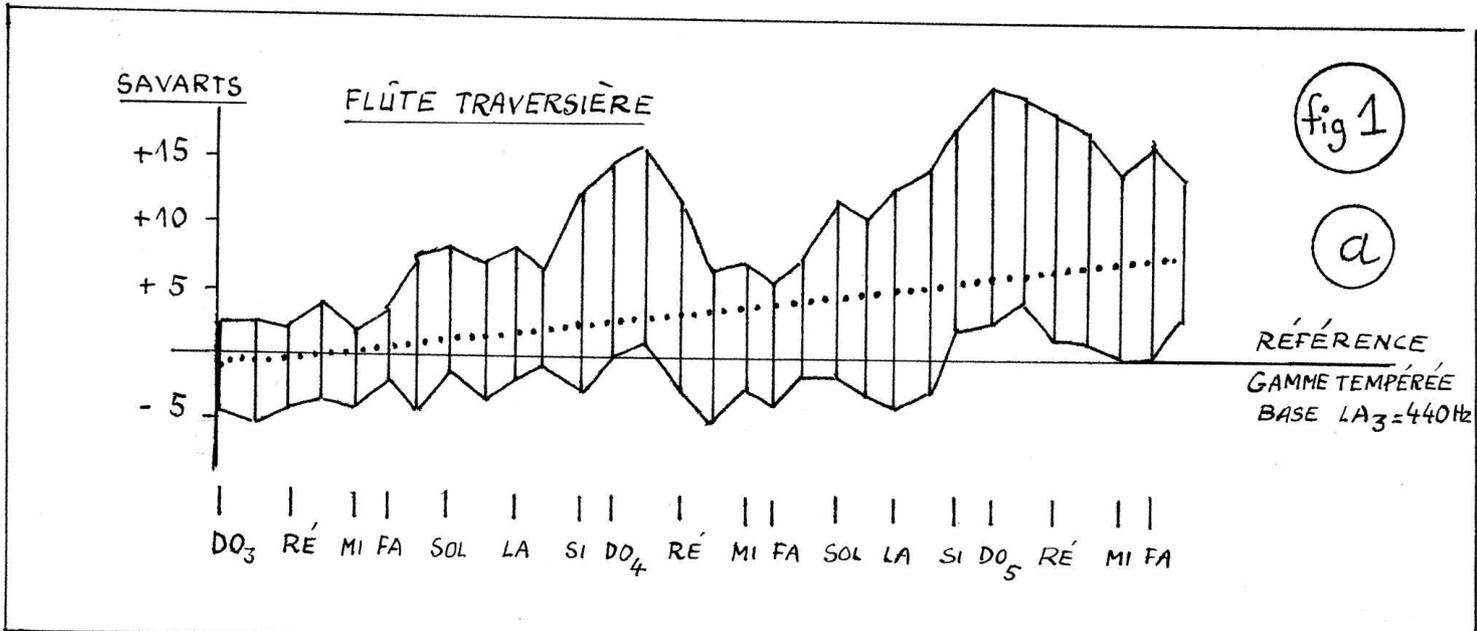
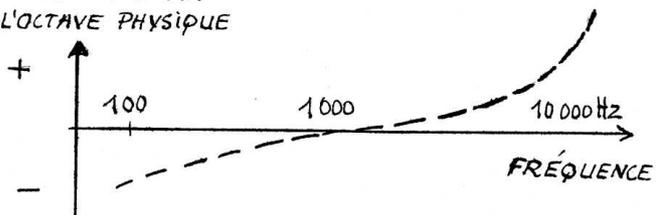


fig 2

a

b

ECART PAR RAPPORT
A L'OCTAVE PHYSIQUE



3. RESULTATS DES EXPERIENCES DE PSYCHOPHYSIOLOGIE

a) Expériences de STEVENS VOLKMAN et NEWMAN (1937). Les Mels

En 1937 STEVENS et ses collaborateurs expérimentent sur la sensation de hauteur de deux sons successifs. Ils demandent à 5 sujets de régler la fréquence d'un son sinusoïdal de façon que sa hauteur paraisse être la moitié de celle d'un son de référence, ceci pour 10 fréquences échelonnées de 100 à 10 000 Hz. Ils constatent alors que la sensation de hauteur n'est pas liée de façon linéaire à la fréquence. Tout se passe comme si les sujets entendaient les octaves plus courtes dans le grave et plus grandes dans l'aigu, la référence étant l'octave physique caractérisée par un rapport de fréquence égal à 1/2 (ou 2).

fig 2a

Nous avons reproduit fig.2a les résultats publiés par STEVENS dans son ouvrage Hearing (p.80). Il s'agit de la moyenne des résultats pour les 5 sujets. La droite passant par l'origine est la référence physique. On voit que la courbe expérimentale se situe au dessus de cette référence jusque vers 1000 Hz, puis passe au dessous.

fig 2b

On peut présenter les résultats d'une autre manière en exprimant l'écart, par rapport à l'octave physique, des octaves réglées par les 5 sujets, en fonction de la fréquence du son réglé : c'est la figure 2b qui montre un agrandissement graduel de l'octave réglée, des basses vers les hautes fréquences; la coïncidence avec la mesure physique se situe vers 1000 Hz. Pour raccorder la sensation de hauteur mélodique avec la mesure physique et conserver les rapports numériques fondamentaux STEVENS propose une nouvelle unité : le MEL.

Par convention 1000 mels équivalent à 1000 Hz
On voit donc que 2000 mels " " 2070 Hz environ.

Autrement dit, l'octave juste, 2000/1000 mels = 2 sera produite par deux fréquences dont le rapport est supérieur à 2 ici 2070/1000 Hz = 2,07.

En fait cette nouvelle unité n'a jamais trouvé d'application pratique mais il devait rester de cette expérience l'idée que les intervalles mélodiques aigus devaient être agrandis, physiquement parlant, pour sembler justes à l'oreille.

Ce résultat expliquerait bien que les relevés de justesse des flûtes que nous avons examinés tendent à s'incurver vers l'aigu. Mais il est prudent de remettre en cause une expérience isolée faite avec quelques sujets dont nous ne connaissons pas le niveau de technique musicale. Depuis les expériences de STEVENS, de nombreux chercheurs se sont penchés sur ce problème. Nous ne rendrons compte que des expériences les plus récentes.

b) Expériences de J. SUNDBERG et LINDQVIST

Dans une première recherche, FRANSSON, SUNDBERG et TJERNLUND mesurent la justesse des musiciens en cours de jeu, sur leur instrument. Ils demandent à 3 musiciens professionnels, un flûtiste, un hautboïste et un violoniste de jouer d'abord une phrase musicale puis d'improviser, enfin de jouer sur commande des notes isolées prises au hasard. La référence de justesse est le

...../

tempérament égal.

fig 3 Les mesures faites avec le violoniste montrent une grande dispersion, ce qui s'explique aisément en jeu solo où l'instrumentiste peut user de l'attraction à son gré (fig. 3b). Le hautbois et la flûte montrent une tendance à la hausse dans l'aigu, mais en ce qui concerne la flûte nous savons que l'instrument a déjà cette caractéristique. Pour interpréter valablement les résultats, il faudrait conjointement le champ de liberté des hauteurs de ces deux instruments.

fig 4 Lors d'une deuxième recherche, SUNDBERG et LINDQVIST établissent une série d'expériences avec des sons électroniques complexes (riches en harmoniques), au cours desquelles le sujet doit régler la fréquence d'un son à l'octave aiguë de celui qu'on lui donne à écouter. On peut voir les résultats fig. 4. Les auteurs montrent en particulier que la perception de la hauteur dépend aussi, pour les sons complexes, de l'intensité; STEVENS avait déjà montré l'importance de cette dépendance pour les sons sinusoïdaux. Pour 65 et 90 dB, les octaves réalisées sont tantôt plus courtes (1/3 des résultats) tantôt justes ou plus grandes. Pour 80 dB toutes les octaves sont plus grandes que l'octave physique.

Les expériences sont faites avec soin, le sujet réglant 10 fois une octave donnée, chaque résultat de la figure est la moyenne de dix mesures. On peut toutefois faire quelques réserves :

- il n'y a que 4 sujets de test dont deux ne sont pas entraînés à régler la hauteur sur leur instrument (piano et orgue) et le troisième n'est pas musicien professionnel.
- le nombre des fréquences testées est faible eu égard à l'étendue ouverte. Ce sont les octaves de 105, 190, 330, 600, 1050 et 2000 Hz. On n'a donc que des jalons très espacés dans l'aire audible.
- trois fréquences seulement rentrent dans la zone qui nous préoccupe (supérieure à 1000 Hz).
- Enfin les sujets de ces expériences ne sont pas les musiciens avec lesquels on a fait les mesures de justesse.

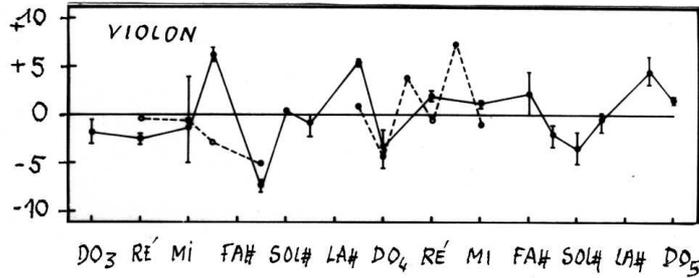
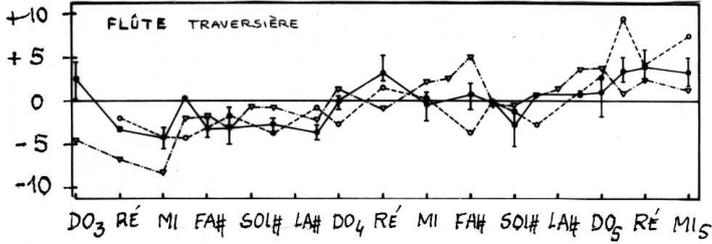
Avant de connaître les résultats de cette recherche nous avons déjà fait quelques tests de notre côté. Etant donné l'orientation différente que nous avons prise il nous est apparu nécessaire de poursuivre nos propres expériences. Nous allons maintenant en rendre compte.

4. EXPERIENCES FAITES AU LABORATOIRE D'ACOUSTIQUE.

Il s'agit d'offrir au sujet la possibilité de régler l'intervalle entre 2 sons entendus successivement, à l'octave l'un de l'autre. L'instrument le plus aisément maniable par toutes sortes de musiciens étant le générateur électronique, nous fûmes contraints de l'utiliser, étant entendu que chaque fois que cela serait possible (violoniste, flûtiste voire chanteur) nous ferions quelques tests sur l'instrument pour comparer les résultats et juger de leur validité.

Dans un premier temps nous avons, par mesure de simplicité, utilisé des sons sinusoïdaux. Ceci peut se justifier dans la mesure où l'on peut supposer que dans les fréquences aiguës qui nous intéressent, la composition spectrale des sons

SAVARTS

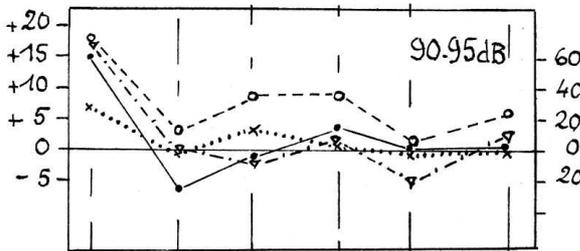
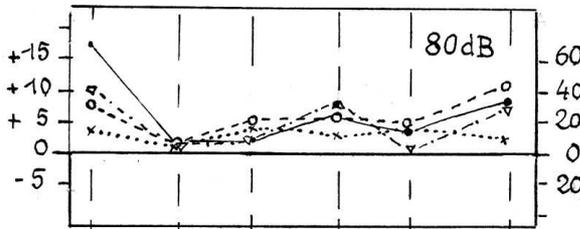
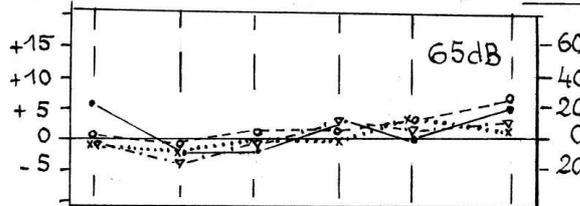


Mesure de la justesse en cours de jeu [J.S et L]

- fig3
- Cadence de concerto (commune aux 2)
 - Flûte : m cadence sur une autre flûte
 - Violon : mélodie "Schön Rosemarin"
 - ▽---▽ Flûte : improvisation -

SAVARTS

CENTS



octaves { 105 190 330 600 1050 2000 Hz
210 380 660 1200 2100 4000 Hz

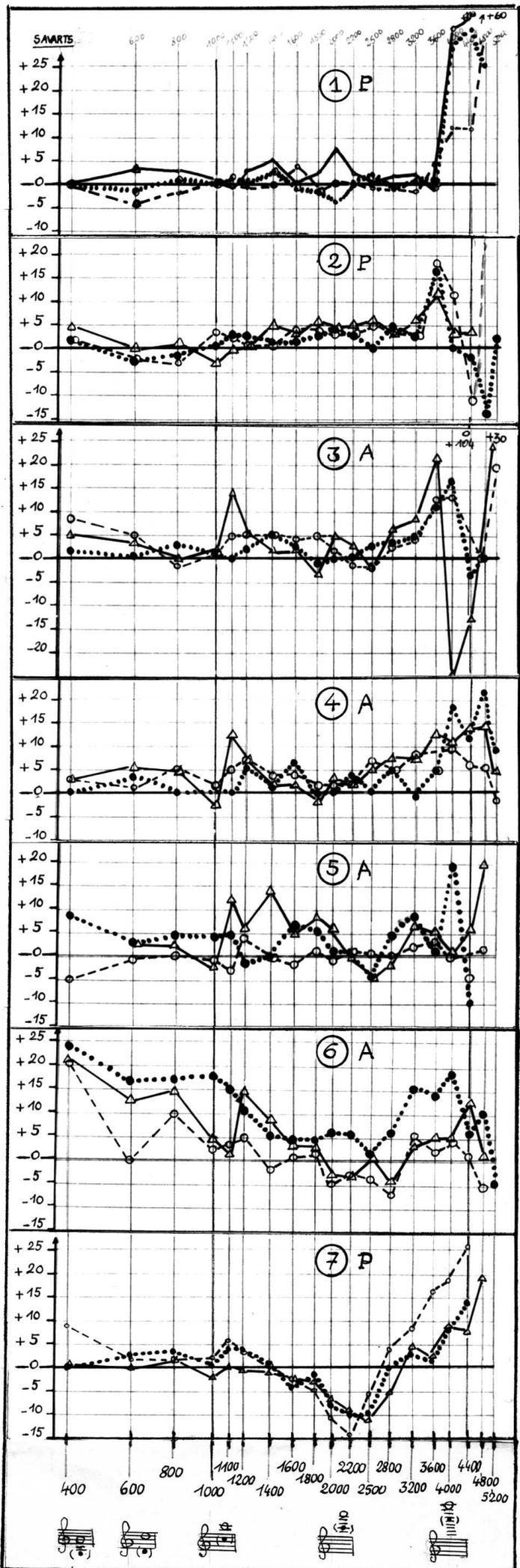
fig4 Expériences de SUNDBERG et LINDQVIST

- x...x Violon (P)
- Piano (P)
- ▽---▽ Orgue (P)
- chant (A)

P = Professionnel
A = Amateur

fig5

EXPÉRIENCE
M. CASTELLENGO



joue un rôle secondaire.

L'expérience se déroule dans une pièce calme, sans réverbération marquée, en champ libre. Le sujet, dont nous possédons par ailleurs l'audiogramme, peut régler l'intensité des sons de façon que les conditions du test lui soient agréables. Dans tous les cas nous travaillons à intensité moyenne entre 60 et 70 dB.

Le sujet dispose d'un interrupteur à bascule (*) lui permettant de faire alterner à son gré le son 1, la référence grave, et le son 2 qu'il doit ajuster à l'octave du premier. Il est intéressant de constater les différences de comportement en ce domaine. Certains sujets passent très rapidement d'un son à l'autre, (2 fois par seconde), d'autres écoutant longuement un son puis l'autre.

L'épreuve comporte en tout 19 fréquences, ce qui est beaucoup eu égard à la fatigue du sujet. Mais nous demandons un réglage relativement rapide, d'une part pour se rapprocher du jeu instrumental, et d'autre part pour que la durée du test n'excède pas 30 minutes. Les fréquences les plus aiguës, donc les plus difficiles à régler, se trouvent en fin de séance. Celle-ci est d'ailleurs entrecoupée, si le sujet le désire, de conversations et remarques diverses, ce qui lui permet de se reposer de l'écoute des sons électroniques rapidement fatigants. Les musiciens professionnels, sujets les plus intéressants, en éprouvent particulièrement le besoin.

Etant données les nombreuses variables inhérentes aux conditions d'expérience, il est indispensable que le sujet puisse exécuter le test au moins 3 fois.

Premiers résultats :

fig 5

Les premiers résultats nous ont assez fortement surpris. Au bout de 3 séances les erreurs se compensent plus ou moins on dispose pour chaque individu d'une courbe qui lui semble bien spécifique. On peut voir figure 5 les résultats obtenus avec les 7 premiers sujets (un P et un A distinguent professionnels et amateurs). La fréquence de la note ajustée (son 2) est indiquée tout en bas de l'image ainsi que la notation musicale de quelques octaves repères.

Les courbes sont loin de montrer l'agrandissement progressif des octaves que laissait prévoir l'expérience de STEVENS. Un sujet, N° 7, présente même l'inverse : ici les octaves dont la note supérieure est comprise entre 2000 et 2500 Hz sont près d'1/4 de ton plus courtes que l'octave physique ! (Rappel : 1/2 ton = 25 savarts ou 100 cents). Le sujet 6 agrandit considérablement l'octave dans les basses fréquences; l'agrandissement diminue avec l'augmentation de fréquence jusque vers 2500 Hz où le phénomène s'inverse. Le sujet 1 réalise à peu de choses près l'octave physique de 400 à 3600 Hz puis brusquement agrandit l'intervalle de façon démesurée. Cette cassure autour de 3600 Hz est nette aussi chez les sujets 2, 3 et 5. D'autres, N° 4 et 6 semblent reculer la limite au delà de 3600 Hz.

Conclusions :

Suscitée par l'interprétation des diagrammes de justesse des flûtes, cette expérience rentre en fait dans le cadre général d'une série de recherches sur l'oreille des musiciens, entreprises au Laboratoire d'Acoustique, sous la direction de M. LEIPP.

Les premiers résultats confirment déjà l'intérêt de tests utilisant des fréquences de référence plus nombreuses qu'on ne le fait habituellement. De ce point de vue il est regrettable que les audiomètres disponibles sur le marché ne

...../

(*) voir page suivante.

permettent qu'un test très grossier de l'oreille. Dans notre expérience, à partir de l'octave 500/1000 Hz, la succession des fréquences forme grosso-modo une gamme par tons, jusqu'au suraigu.

A première vue, les idées généralement admises relativement à l'agrandissement de l'intervalle d'octave avec la fréquence, ne semblent pas confirmées par nos résultats. La réalité est plus complexe et il semble y avoir de grandes variations d'un individu à l'autre. Nous nous proposons donc de poursuivre ces tests et surtout de mener parallèlement une étude de la justesse du jeu des musiciens (flûte, violon...), si possible avec les mêmes sujets.

En ce qui concerne la justesse des flûtes, à défaut de pouvoir trancher la question posée au début de cette étude, nous sommes en mesure d'expliquer les divergences d'opinion qui existaient entre les sujets 6 et 7 à propos des octaves aiguës de la flûte à bec soprano. Sur ce point déjà, l'expérience se raccorde bien avec la réalité musicale !

BIBLIOGRAPHIE :

- LEIPP (E) - Les champs de liberté des instruments de musique.
Bulletin du G.A.M. N° 10 (1965).
Edité par le laboratoire
- CASTELLENGO (M) - La flûte traversière
Bulletin G.A.M. N° 35 (1968)
- Le problème de la justesse des flûtes
Conférence d'Acoustique de Budapest (1967).
- STEVENS (S) et DAVIS (H) - Hearing
Ed. J. WILEY and sons. New-York (1938) - p. 76 à 81.
- FRANSSON (F), SUNDBERG (J) et TJERNLUND (P)
- Statistical computer measurements of the tone-scale in played music.
Speech Transmission Laboratory - QPSR 2-3 (1970) p. 41-45 - Stockholm.
- SUNDBERG (J) et LINDQVIST
- Musical octaves and pitch.
JASA - Vol. 54 - n° 4 (1973) - p. 922 à 929 . (on trouvera une bibliographie détaillée à la fin de cet article .)

M. CASTELLENGO.

(*) L'appareillage électronique mis en oeuvre pour ce test a été réalisé par les électroniciens du Laboratoire de St-Cyr-l'École (Université - PARIS VI) que nous remercions bien vivement.