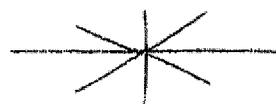


E. LEIPP



MECANIQUE ET ACOUSTIQUE
DE L'APPAREIL PHONATOIRE

DECEMBRE 1967

N° = 32

G A M

BULLETIN DU GROUPE D'ACOUSTIQUE MUSICALE
FACULTÉ DES SCIENCES - 8 RUE CUYIER - PARIS 5^e

G.A.M.

Groupe d'Acoustique Musicale
Laboratoire d'Acoustique
Faculté des Sciences
8 Rue Cuvier - PARIS 5°

Adresse Postale
9, Quai St-Bernard - 5°

PARIS, le 5 Décembre 1967

BULLETIN N° 32

1°) REUNION DU 29 NOVEMBRE 1967

Etaient présent.

M. le Professeur SIESTRUNCK, Président
M. LEIPP, Secrétaire général, Melle CASTELLENGO, secrétaire.

Puis, par ordre d'arrivée

Melle PAOUNOFF (Etudiante en médecine); M. FURTH (Laboratoire de Chimie); M. CARCHEREUX (Maître luthier); Dr CLAVIE (Dr en médecine); M. JAMET (Etudiant IDN); M. BATISSION (Secrétaire Technique SIERE); M. BERNARD (CSU LE MANS); M. RENAUDIN (Classe de Musicologie POITIERS); Mme et M. TURITZ (Compositeur); Melle Sylvie HUE (Conservatoire); M. KLEIN (Pianos); Mme NYEKI (Phonothèque Nationale); M. BREMONT (Laboratoire de Physiologie Animale INRA); M. BUSNEL (Directeur du Laboratoire de Physiologie animale INRA); M. SACKUR (Professeur); M. CORNET (Etudiant en Sciences); Mme PATROIS (Etudiante Lycée Lafontaine); Dr. MARCIE (Institut National des Sourds muets); Mme BOREL-MAISONNY (Orthophoniste); Melle DINVILLE (orthophoniste); Dr. BURGEAT (Service d'exploration fonctionnelle Hopital Lariboisière); M. F. FORET (Compositeur); Mme EQUOI (Professeur de Musique); M. EQUOI (Professeur); M. Jean BORIS (Architecte); M. GEORGAIS (Professeur Lycée La Fontaine); M. CHAVASSE (Ingénieur en Chef CNET); Mme DORGEUILLE (Professeur d'éducation musicale); Dr. KADRI (Docteur en médecine); M. TRAN VAN KHE (Musicologue); Dr. DORGEUILLE (Docteur en médecine); M. CUILLERIER (Etudiant IDHEC); Mme FULIN (CNRS); M. J.S. LIENARD (Ingénieur Arts et Métiers) et Mme LIENARD; Mme et M. DUPARCQ (Directeur REVUE MUSICALE); M. VICHNIEVSKY (Professeur à la Faculté des Sciences). Françoise LEIPP (Etudiante orthophonie).

Excusés : M. L. GAUTHIER, Vice Doyen de la Faculté des Sciences; M. J. CHAILLEY (Directeur de l'Institut de Musicologie). M. CH. MAILLOT; Mme GRIMAUD; M. DUSSOTOIT; M. Akira TAMBA; M. CONDAMINES; M. PUJOLLE; M. ABITEBOUL; M. BASCHET; M. TOURTE; M. GILOTAUX; M. PHILIPPOT; M. Raymond LYON; M. PERIN; Dr APAP; Dr. VALLANCIEN; Dr LAFON; M. DASSE; M. CANAC; M. ROUGET; M. AGOSTINI; M. BLONDELET; M. LEROY; M. PUBLAN; Mme CHARNASSE; M. MOLES; M. Alain MEYER; M. FAVRE; M. SAINT GUIRONS; M. CLAEVER; M. CHENAUD; M. REIBEL; M. CHIARUCCI.

2°) Grâce à M. TRAN VAN KHE nous avons pu enregistrer un concert de SITAR indien (avec M. CHAUDURI); cet instrument qui est très connu depuis les concerts de RAVI SHANKAR, présente des similitudes avec la vina du point de vue de la lutherie;

...../

mais le style de jeu en est fort différent. Si l'occasion s'en présente, nous ferons un jour une réunion GAM sur cet instrument.

- 3°) O R I O C. Nous avons le plaisir de vous signaler la naissance d'un bulletin donnant les informations artistiques et culturelles concernant toutes les manifestations orientales; récitals, expositions, stages, enseignement d'instruments orientaux, conférences, publications, disques etc... Pour tous renseignements s'adresser à Mme de LAVANDEYRA 7, Villa Coeur de Vey - PARIS 14°, qui en assure la publication.
- 4°) M. TURITZ. Nous avons eu la visite de M. TURITZ compositeur américain qui est actuellement en stage d'information en France et qui s'intéresse particulièrement aux problèmes des musiques expérimentales. (M. TURITZ - 43 Rue de Douai, PARIS 9°).
- 5°) M. AEBI. Passionné par les problèmes d'acoustique relatifs aux trompes de chasse, cet industriel suisse nous a apporté un cor des Alpes, curieuse trompe conique droite de 3,75 m de long que nous allons étudier au Laboratoire. Nous aurons au début de l'année (mars probablement) une réunion GAM sur ce thème qui promet d'être intéressante, car M. AEBI nous a également donné une méthode et des disques.
- 6°) M. CHENAUD. Président de l'AFARP nous a offert une cithare viennoise, instrument qui a été popularisé naguère dans un film célèbre (Le troisième homme) par ANTON KARASS. Nous pensons également à une réunion ultérieure du GAM à ce sujet.

P L A N

	<u>Pages</u>
I. <u>GENERALITES</u>	1
II. <u>UN MODELE ANLOGUE DE L'APPAREIL PHONATOIRE:</u>	4
<u>L'instrument de musique à embouchure de cor</u>	
1°) Description d'un excitateur intéressant ; le système lèvres-embouchure de cor.....	
2°) Mécanisme de fonctionnement du système excitateur	6
3°) Acoustique du système excitateur.....	8
4°) Les " corps sonores " aériens et leur couplage avec l'excitateur	12
III. <u>L'APPAREIL PHONATOIRE HUMAIN ET SON FONCTIONNEMENT</u>	15
1°) Description schématique.....	15
2°) L'excitateur et sa mécanique	16
3°) Acoustique du système excitateur vocal...	18
4°) Le système des résonateurs vocaux et son couplage avec l'excitateur.....	21
IV. <u>LES SIGNAUX RAYONNES PAR L'APPAREIL PHONATOIRE..</u>	22
1°) Typologie élémentaire des signaux	22
2°) La combinatoire des signaux élémentaires.	23
V. <u>CONCLUSIONS</u>	24

I - GENERALITES

=====

L'appareil phonatoire, sa mécanique et son acoustique ont intrigué les esprits curieux, depuis fort longtemps. Il serait certainement instructif de relire l'ensemble des textes écrits sur ce sujet depuis l'origine ! On constaterait probablement que tout a été dit, que toutes les hypothèses ont été formulées. Nos prédécesseurs n'étaient pas plus sots que nous : certains étaient doués d'un sens de l'observation très fin. Il n'est que de relire MERSENNE ou VON KEMPELEN pour s'en convaincre ! Mais les observations, en tout domaine, restent liées aux moyens dont on dispose pour faire les investigations. On sait à quel point la technique nous avantage actuellement, comparativement à nos prédécesseurs. Et cependant, où en sommes-nous dans le domaine des mécanismes phonatoires ? L'existence actuelle de nombreuses théories contradictoires, les controverses passionnées récentes : tout montre que le problème est loin d'être résolu malgré les efforts d'innombrables chercheurs, et il est intéressant d'analyser les causes de cet état de fait. Nous en voyons plusieurs :

- La terminologie. Nous avons attiré l'attention sur ce point à de nombreuses reprises et, plus qu'ailleurs, il est nécessaire d'y revenir ici.

Lorsqu'on se documente sur l'anatomie du système phonatoire, la terminologie est généralement claire et ne laisse pas subsister d'ambiguïté. On peut bien regretter qu'on ait appelé tel système vibrant des " cordes vocales ", qu'on ait appelé tel autre, dont la fonction est tout à fait différente, " cordes vocales supérieures " ; mais enfin il n'y a là rien de bien grave.

Le problème devient beaucoup plus compliqué lorsqu'on aborde la physiologie du système et de ses éléments. Nous prendrons un seul exemple pour illustrer notre propos. Nous lisons par exemple (bib.1) : " Le larynx fonctionne suivant le principe des embouchures d'anches à bourrelets ... "

Il serait important dès lors de préciser ce qu'on appelle " anches à bourrelets " et de définir au préalable le " principe " des embouchures "...", car à notre connaissance personne ne l'a formulé ni en physique ni en physiologie. D'autre part si on essaye de se documenter sur la signification du mot, " anche " on trouve les définitions les plus variées du mot. Pour DOM BEDOS ou MERSENNE, l'anche d'un tuyau d'orgue est ce petit demi-cylindre terminé au bout par un quart de sphère et que les autres appellent plus communément " rigole ". Pour les physiologistes qui se sont intéressés au problème, l'anche est cette lamelle vibrante qui vient se placer sur la rigole et l'obturer partiellement; or cette lamelle les organiers l'appellent " languette " etc...

...../

On retrouve le même problème lorsqu'il s'agit de tuyaux à bouche où les uns appellent " biseau " ce que les autres désignent par le nom de " fond ", le même mot de biseau désignant alors une autre partie.

En bref, l'absence de normalisation et de précision dans la terminologie crée une regrettable confusion dans les textes et dans les esprits; elle est à la base de disputes et de malentendus insolubles.

- La méthodologie. L'observation des organes phonatoires pose des problèmes d'une difficulté extrême.

- la laryngoscopie systématique a été imaginée il y a bien longtemps. Des premières observations de LEVRET au milieu du 18^e siècle, à celles de FARNSWORTH en 1940, où les phénomènes étaient filmés, ou aux observations stroboscopiques actuelles, on a toujours rencontré le même obstacle : il n'est possible d'observer le fonctionnement des cordes vocales que pour une position très particulière du tractus vocal, réalisée en tirant la langue vers l'avant et en chantant la voyelle fixe " à " ... C'est évidemment très limité et on ne peut guère extrapoler pour les autres voyelles chantées, encore moins pour les voyelles normales parlées et les consonnes, où les bandes ventriculaires et l'épiglotte cachent les cordes vocales.

- la radioscopie a levé de grands espoirs au début ; mais il faut bien avouer que les images sont très floues et qu'il faut être initié pour y voir quelque chose; de toutes façons les détails fins échappent à l'observation. La tomographie, qui, par des procédés techniques, permet d'éliminer les ombres d'organes gênants comme la colonne vertébrale et d'isoler un certain plan de l'appareil phonatoire, fournit des images plus précises, mais comme les organes sont des objets à trois dimensions, on perd la vue d'ensemble des mécanismes.

- les observations faites à l'occasion d'interventions chirurgicales ont le grave défaut de détruire partiellement l'organe qu'on veut étudier et, par conséquent, d'en modifier le fonctionnement.

Très généralement on peut formuler à l'égard des observations directes de nombreuses critiques. En particulier, parole et chant sont d'abord mouvement: Une photographie radioscopique ne peut donc pas nous apporter grand chose; il faut au moins l'observation cinématographique, car même la stroboscopie ne permet d'étudier que les phénomènes périodiques comme les voyelles tenues dont l'intérêt est très limité.

Plus grave est la réserve que l'on peut faire au sujet des phénomènes observables visuellement : on ne peut ainsi rendre compte que des phénomènes rentrant dans le pouvoir discriminatoire de notre vue ; or nous savons bien que des amplitudes de l'ordre de 10^{-8} mm autour des fréquences de 2000 Hz, sont parfaitement perçues par l'oreille alors qu'il n'est pas question de les voir

.... /

même avec un microscope. Or, ces phénomènes sont d'importance capitale quant à la perception des messages acoustiques. La question est très bien connue des facteurs d'orgue; un bon harmoniste sait que s'il touche une lèvres de tuyau à bouche ou une anche (languette) avec un outil, une déformation infime et invisible provoque des phénomènes acoustiques très nettement perceptibles " Dès qu'on le voit, c'est trop " ! (Meyer Siat).

C'est à cause des imperfections de la méthodologie que l'on n'arrive pas à raccorder les diverses observations presque toujours très méticuleuses des chercheurs qui s'intéressent à l'appareil phonatoire. De là toutes les hypothèses que les auteurs sont amenés à formuler, plus fragiles encore quand elles tentent d'expliquer les phénomènes neurologiques, où les méthodes d'observation sont encore infiniment plus incertaines que celles de la laryngoscopie.

En bref, l'appareil phonatoire, sa physiologie et son acoustique posent des problèmes d'une inextricable complexité si on se propose de le comprendre à travers la description détaillée de la réalité telle que nous la fournissent les manuels d'anatomie : on est positivement noyé dans la complexité des cartilages, des muscles, des nerfs. Mais nous savons combien il est précieux dans des cas analogues, de chercher à comprendre les phénomènes en les simulant à l'aide de machines plus simples, dont l'analogie de fonctionnement est évidente, où l'on peut modifier à loisir les éléments et que l'on peut observer de façon beaucoup plus simple et efficace. Cette idée avait déjà conduit les chercheurs à comparer l'appareil phonatoire à un instrument de musique : clarinette, hautbois, saxophone, trompette etc... Mais cela suppose une connaissance approfondie du fonctionnement de ces instruments, ce qui n'est manifestement pas le cas, car on peut le dire sans risque d'être contredit : l'étude systématique des instruments de musique reste à faire; en dehors de quelques rares publications parues dans des journaux spécialisés, on ne trouve, depuis les ouvrages de BOUASSE a(bib.2), que des compilations extrêmement lacunaires et simplistes sur ces problèmes. Or les ouvrages de BOUASSE datent du début de l'invention de l'oscillographe cathodique... Il se trouve cependant que le fonctionnement des instruments de musique est depuis de nombreuses années l'objet de nos préoccupations essentielles; et nous disposons maintenant de moyens d'investigation autrement élaborés que ceux dont disposait BOUASSE. Nos recherches en ce domaine nous ont conduit à étudier divers instruments de musique qui sont en fait de véritables modèles analogues de l'appareil phonatoire. Certains d'entre eux présentent même une similitude tellement frappante que nous avons pensé utile de proposer au préalable quelques observations et expériences à leur sujet. On verra à quel point les conclusions que l'on peut en tirer relativement à l'appareil phonatoires sont intéressantes; c'est le cas, tout particulièrement de la famille des instruments à embouchure de cor.

...../

II - UN " MODELE ANALOGUE " DE L'APPAREIL PHONATOIRE :
L'INSTRUMENT DE MUSIQUE A EMBOUCHURE DE COR

=====

Un son est une variation ^{perçue} de pression de l'air, périodique ou non. Un instrument de musique est une machine à fabriquer ces variations de pression.

Il n'existe qu'un nombre relativement restreint de moyens mécaniques pratiques pour y atteindre. Ces moyens ont tous été utilisés depuis les temps les plus anciens en facture instrumentale, d'abord pour communiquer des messages, ensuite pour faire de la musique - ce qui est la même chose. Tous les instruments comportent nécessairement un système excitateur (marteau, archet, corde, anche) et un " corps sonore " (plaques, colonne d'air etc..) qui amplifie en le " filtrant " et en le déformant de diverses manières le signal de l'excitateur.

Etudions donc, pour commencer, un système excitateur particulièrement proche du problème qui nous concerne ici.

1°) DESCRIPTION D'UN SYSTEME EXCITATEUR INTERESSANT : le système lèvres-embouchure de cor.

Cet excitateur comprend deux éléments bien adaptés l'un à l'autre : les lèvres et une embouchure de cor.

- les lèvres. Elles comportent deux types de muscles : le muscle orbiculaire, sphincter qui permet d'écartier plus ou moins les lèvres ou de les serrer plus ou moins fortement l'une contre l'autre, et le muscle buccinateur qui permet d'allonger la bouche vers l'avant dans le sens de son axe. Le nom de " buccinateur " est justifié du fait que le joueur de trompette (ou buccin autrefois) allonge les lèvres plus ou moins vers l'avant lorsqu'il embouche son instrument, l'habitude créant une déformation professionnelle.

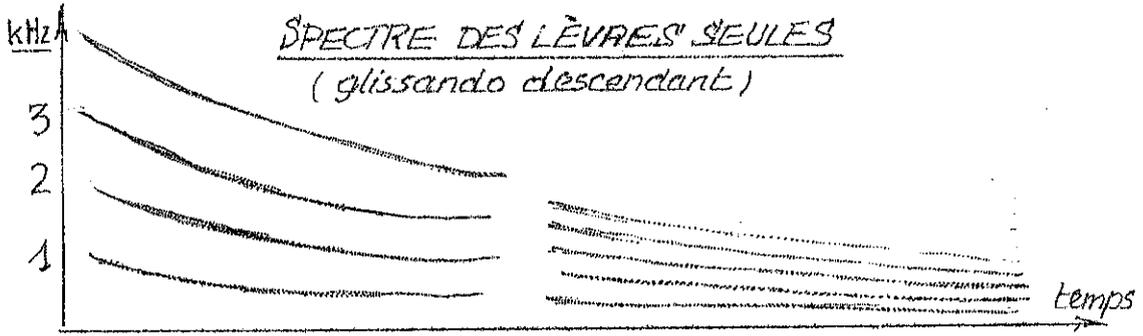
Les lèvres sont recouvertes d'une muqueuse plus ou moins fine selon les individus, plus ou moins tendue, et qui est susceptible de " fluer " à divers degrés selon les cas, c'est-à-dire de " glisser " sur les muscles, comme la peau sur le dos de la main.

D'un individu à l'autre, la forme et la force des muscles ainsi que les caractéristiques de la membrane sont variables dans une large mesure, mais dans tous les cas le système est modifiable à volonté. Ainsi on peut :

- allonger latéralement les lèvres
- les écartier l'une de l'autre
- les avancer et les retirer
- les raidir plus ou moins
- les gonfler (augmenter leur masse)

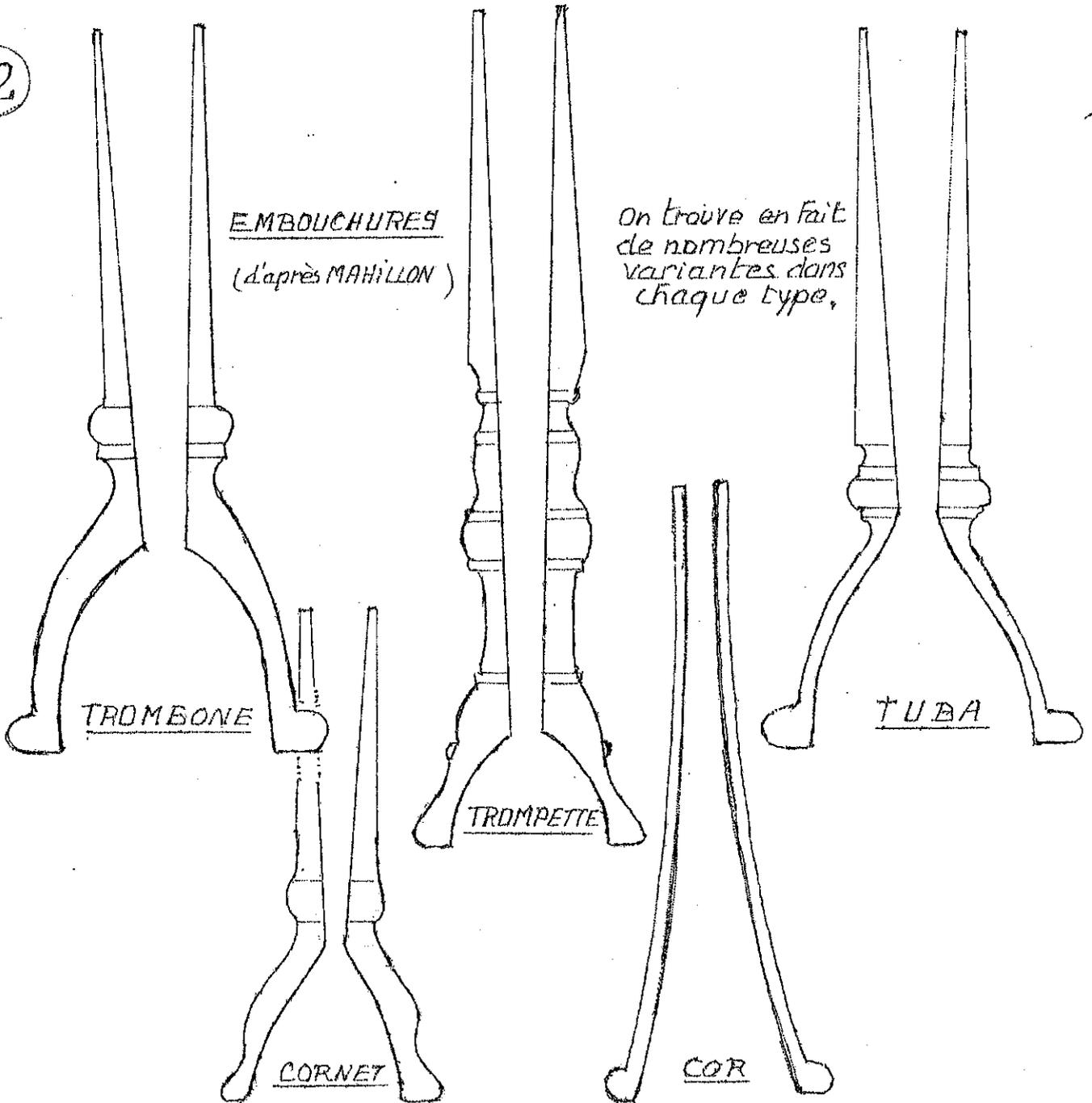
.... /

Fig 1



En serrant plus ou moins les lèvres au départ, on peut couvrir quelque deux octaves. Mais l'attaque du son est incertaine.

Fig 2



- les faire vibrer en les serrant convenablement et en les excitant par l'air comprimé fourni par les poulmons.

Ce dernier point est capital et on vérifie qu'il est possible de modifier le signal en hauteur, intensité et timbre en réglant de diverses manières les mouvements précédents. Avec un peu d'entraînement, on peut produire ainsi un " glissando " ascendant ou descendant, dont l'analyse révèle qu'il s'agit d'un signal riche comportant une série complète d'harmoniques, pairs et impairs (Fig.1). L'expérience montre également qu'il est difficile de " démarrer " le mouvement vibratoire - qui, une fois lancé, s'entretient facilement. Mais, en fait il est difficile de " piquer " telle ou telle hauteur d'une façon précise : il faut tâtonner, et le signal est instable en fréquence. C'est pour parer à ces deux inconvénients que les facteurs d'instruments, dès l'origine des temps, on inventé l'embouchure.

- l'embouchure. Très rapidement, en partant de la corne animale convenablement coupée de son extrémité, les fabricants de cors ont étudié les formes d'embouchures les plus appropriées à ce qu'ils recherchaient. L'étude fut empirique certes, mais nous savons que les solutions adoptées sont extrêmement élaborées et fonctionnelles. Ainsi en est-on venu, petit à petit, à fabriquer des modèles adaptés aux divers cas (fig.2) tel modèle permet d'obtenir plus facilement des fréquences graves (tuba), tel autre donne un son beaucoup plus intense et éclatant (trope de chasse, trompette etc...). Tous les modèles que l'on trouve actuellement sur le marché, sont parfaitement adaptés au rôle qu'on leur demande, et, dans chaque cas, il existe des variantes telles que chacun peut obtenir un rendement acoustique optimum, eu égard à la conformation de ses lèvres et à leurs performances musculaires.

Il est étonnant que si peu de chercheurs se soient intéressés aux solutions toutes faites et éprouvées qu'apporte la lutherie traditionnelle et dont l'étude, est du plus haut intérêt comme on va voir. Citons cependant les expériences de D.W. MARTIN, en raison de leur importance dans ce qui va suivre.

D.W. MARTIN avait l'intention de cinématographier les lèvres du trompettiste en jeu normal. Il fabriqua donc une embouchure spéciale, en matière plastique transparente, traitée spécialement pour réduire la tension superficielle des gouttelettes de buée éventuelles qui auraient pu se déposer et voiler l'image. Le petit tuyau, au lieu de se prolonger dans l'axe de l'embouchure, est dévié latéralement (fig.3). Ainsi le musicien peut-il jouer normalement l'instrument, et il est possible de filmer simultanément les mouvements de bouche, vue de face et de côté.

A partir des images cinématographiques, D.W. MARTIN a fait des mesures de déplacement latéral et axial des lèvres. Les diagrammes qu'il donne sont d'une importance théorique considérable; ils montrent (fig.4) :

...../

- que la loi d'ouverture des lèvres varie avec la fréquence (fig.4a). Chaque courbe représente un cycle. En abscisse, on porte, en degrés angulaires, la phase du mouvement - ou, si l'on préfère, la durée totale d'un cycle. En ordonnée on lit directement en millimètres l'écartement maximum. On voit que pour 225 Hz le maximum d'écartement est d'environ 3 mm; on observe également que pour cette fréquence, la durée de l'ouverture est plus rapide que la durée de fermeture. Dans l'aigu, (690 Hz) l'amplitude est beaucoup plus faible (1 mm) et l'ouverture beaucoup plus longue que la fermeture. On verra plus loin l'importance capitale de cette observation, sur le plan théorique.

- la loi de vibration axiale (4b) est indiquée pour la lèvre supérieure et inférieure. Pour une note grave, (225 Hz) la lèvre supérieure et inférieure s'avancent et reculent périodiquement de la même quantité à peu près (1,5 mm). Mais le mouvement n'est pas en phase entre les deux lèvres : la lèvre inférieure avance plus vite qu'elle ne recule; pour la lèvre supérieure par contre, la durée d'ouverture est à peu près égale à la durée de fermeture. Aux sons aigus (480 Hz), la lèvre inférieure " avance " beaucoup plus que la supérieure et son amplitude est très faible .. alors que la lèvre supérieure avance un peu plus vite qu'elle ne revient.

Les observations de D.W. MARTIN tombent évidemment sur les restrictions formulées plus haut : ce n'est pas forcément ce qu'on voit qui est auditivement le plus important - du point de vue du timbre en particulier. L'auteur s'est contenté de décrire son expérience et de donner ses résultats sans en tirer de conclusions. Mais nous possédons maintenant les éléments nécessaires en acoustique musicale pour comprendre le mécanisme d'un excitateur lèvres-embouchure et en tirer les conséquences théoriques dont on verra l'intérêt plus loin.

2°) MECANISME DE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME EXCITATEUR LEVRES-EMBOUCHURE.

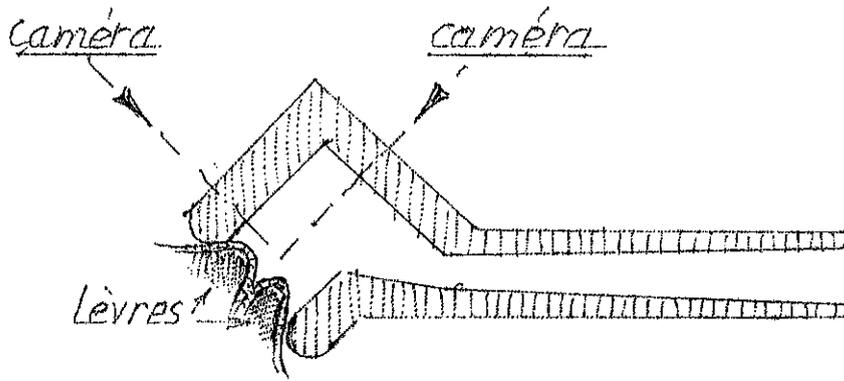
Considérons une embouchure déterminée (fig.5). Posons y les lèvres en leur donnant un certain tonus; cela veut dire qu'elles sont bridées plus ou moins fortement entre le métal et les dents, et que leur partie libre, vers l'avant, possède une certaine force de rappel élastique - que l'on peut apprécier en " pincant " la lèvre à la manière d'une corde de guitare.

La pression d'air est la même en amont et en aval. Augmentons la pression dans la bouche. Agissant normalement sur la paroi, la force F se décompose en deux forces : f_1 qui tend à écarter les lèvres, et f_2 qui tend à les pousser en avant.

Du fait de l'existence de la muqueuse, et selon son état d'épaisseur, d'humidification, d'autonomie relative, celle-ci

(Fig 3)

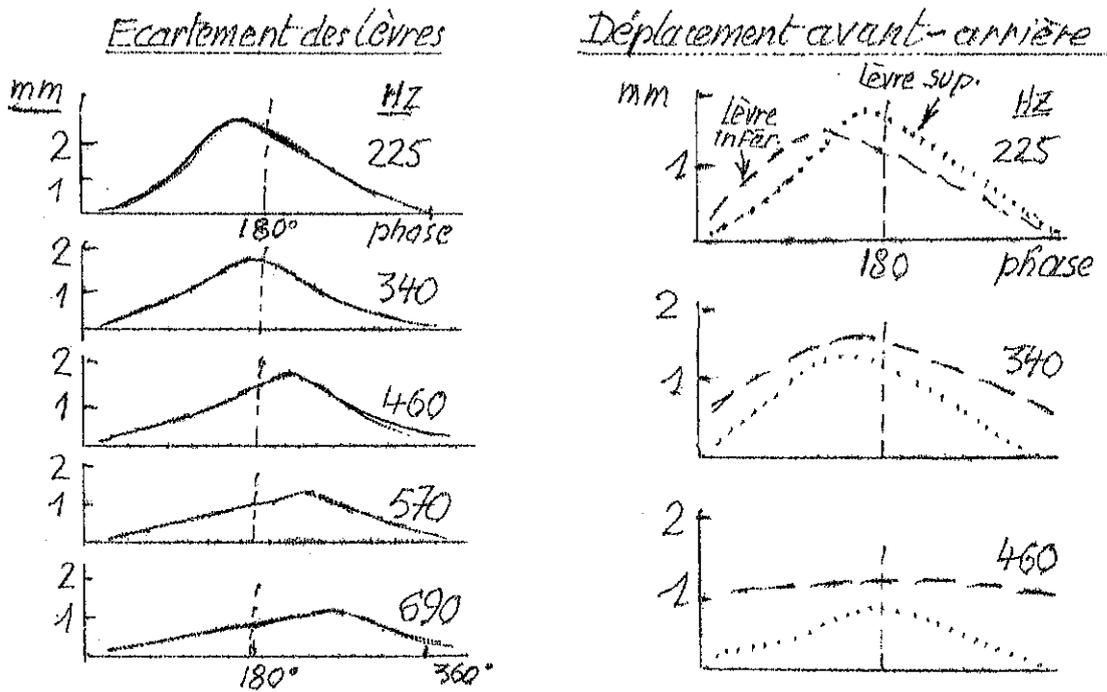
L'embouchure de D.W. MARTIN



Le dispositif permet de filmer les lèvres simultanément de face et de profil.

Les diagrammes de D.W. MARTIN

(Fig. 4)



Le mouvement n'est sinusoïdal ni pour l'écartement ni pour le mouvement avant-arrière. D'où les spectres de raies riches en harmoniques de tous rangs.

fig. 5

Les forces en présence

F_1 tend à écarter les lèvres
 F_2 à les pousser vers l'avant.

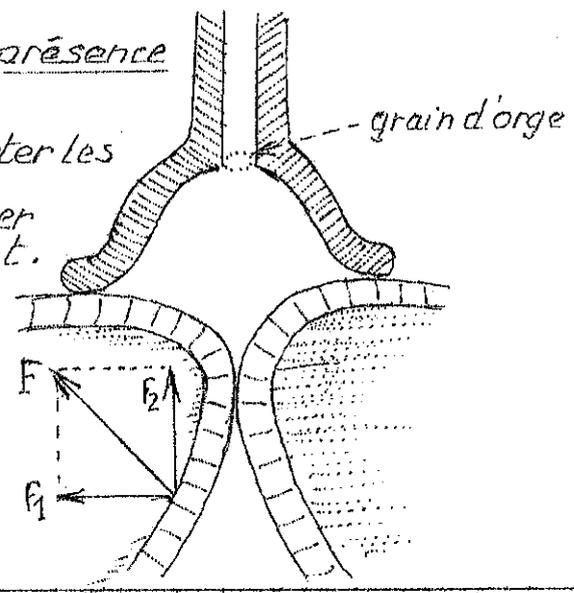
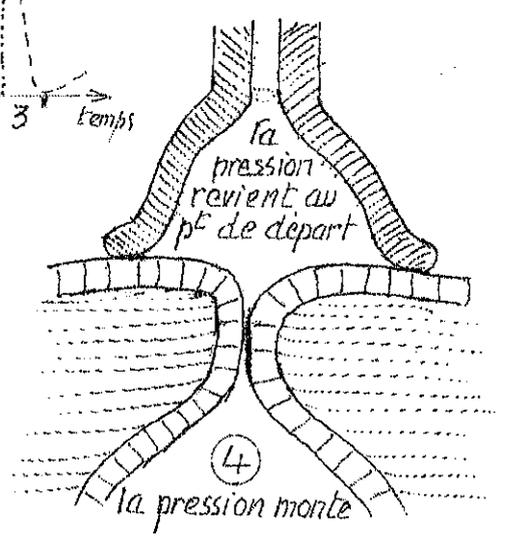
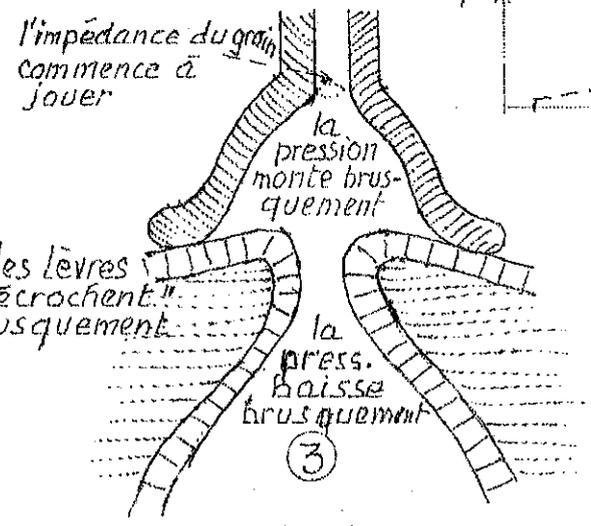
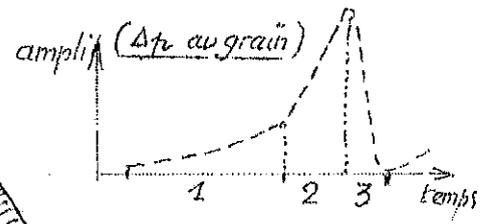
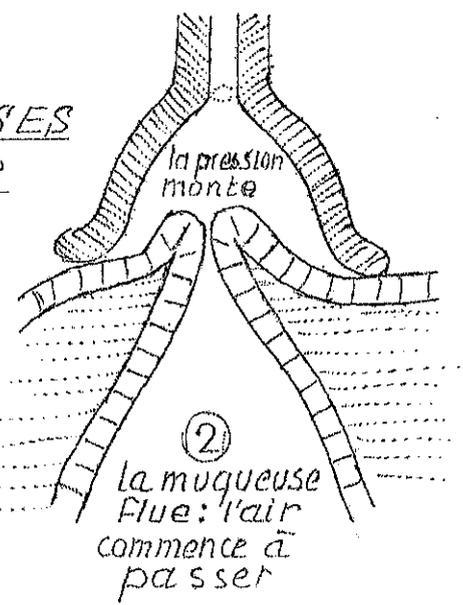
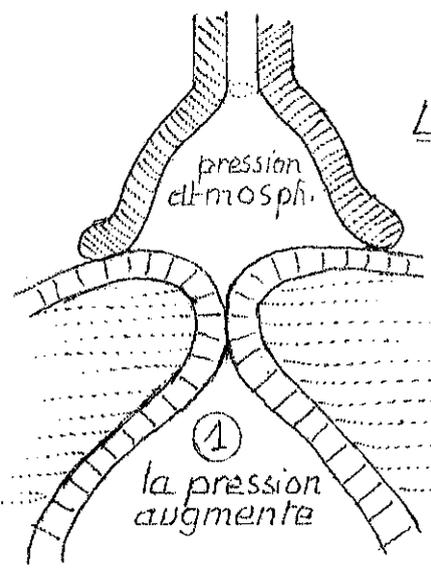


fig. 6

LES PHASES d'une période



Le phénomène perçu est déterminé par la loi de variation de la pression au niveau du grain d'orge. Les rapports de durée entre 1 - 2 et 3 varient avec la fréquence (Expér. D.W.MARTIN)

sera amenée lors de l'avancement de la lèvre, à fluer plus ou moins, c'est-à-dire de créer une espèce de bourrelet vers l'extérieur. Celui-ci peut bien entendu être très apparent ou pratiquement inexistant, selon le cas.

Augmentons graduellement la pression. A un certain point elle sera assez forte pour commencer à écarter légèrement les lèvres. Une lane d'air va commencer à s'écouler. Tant que le débit est faible, le régime d'écoulement sera plus ou moins laminaire. L'air entre dans la cuvette de l'embouchure, puis sort par le petit trou (grain d'orge) de celle-ci; il ne se produira rien d'autre qu'un bruit d'écoulement, venant du frottement de l'air sur les parois et rebords, du grain en particulier. En fait, ce grain est un tout petit trou (diamètre de l'ordre de 3-4 mm) qui offre au passage de l'air une certaine résistance, que l'on peut facilement apprécier en soufflant simplement dans l'embouchure. Avec différents modèles d'embouchure, on note alors des différences de résistance (d'impédance acoustique), selon la section du trou, et aussi selon le débit. Plus on souffle fort, plus la résistance devient sensible.

Que se passe-t-il dans ces conditions lors que nous continuons à augmenter graduellement la pression dans la bouche avec un système lèvres-embouchure (fig.6)? Au début de l'écartement des lèvres, le débit est faible et tout l'air sort sans difficulté par le grain; mais si nous augmentons subitement et brutalement le débit et la pression (coup de langue), l'air ne pourra pas s'écouler assez vite, et la pression augmentera dans la cuvette proportionnellement à l'impédance du grain... Or il viendra un moment où la somme de la force de rappel des lèvres déterminée par la pression dans la cuvette de la force de rappel musculaire des lèvres sera supérieure à la force déterminée par l'air expiré. Dès lors, les lèvres reviendront vers l'arrière et la section inter-lippale finira par s'annuler; la musette reprend sa place normale, puis les lèvres se referment. La pression, en amont des lèvres recommence alors à monter; nous amorçons un deuxième cycle et ainsi de suite, donc un mouvement périodique.

On comprend dès lors l'intérêt du coup de langue; c'est une augmentation brutale de pression et de débit dans la cuvette, qui "appelle" la fermeture des lèvres et lance le régime vibratoire, avec sûreté et quasi instantanément. On vérifie en effet qu'on peut amorcer le phénomène sans coup de langue, mais le démarrage du régime est alors très aléatoire. Cela revient à dire que le "transitoire" est tout à fait indécis et long; on ne peut pas le régler avec précision. Il s'agit là d'un phénomène important en musique. Mais on le retrouvera plus loin lorsqu'il s'agira des bandes ventriculaires dont on n'a pas compris la signification parce qu'on n'observe généralement que les régimes permanents avec les méthodes laryngoscopiques.

En bref, nous avons une explication du mécanisme de lancement et d'entretien du mouvement vibratoire d'un système

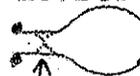
...../

lèvres-embouchure. Etudions à présent l'acoustique du dispositif....

3°) ACOUSTIQUE DU SYSTEME EXCITATEUR LEVRES-EMBOUCHURE

L'expérience montre qu'on peut modifier le signal acoustique en hauteur, intensité et timbre en réglant les lèvres et le souffle de diverses manières. Montrons quels sont les variables en cause et leur rôle dans les divers cas.

a) HAUTEUR. Il est évidemment difficile de régler isolément tel ou tel paramètre relevant des lèvres : nous n'avons pas la sensation précise de nos muscles, et par ailleurs les paramètres ont entre eux des réactions réciproques plus ou moins incoercibles. On peut cependant simuler le fonctionnement des lèvres assez facilement pour montrer certaines particularités acoustiques du système normal lèvres-embouchure. Ainsi nous avons simplement pris un ballon en baudruche avec col. Ce col est légèrement "roulé" vers l'extrémité. On gonfle le ballon et on tend en ^{forme de} "lèvres" le bord roulé du col. On vérifie qu'il n'est pas aisé de lancer le régime : il n'y a pas de cuvette au-dessus, donc pas de résistance; donc le mécanisme décrit plus haut ne peut pas facilement s'établir - comme on l'a vu pour les lèvres seules de la bouche.



Mais si on tend les "lèvres" au milieu du col, et on lance le régime avec la plus grande facilité, car il y a une "cuvette" au-dessus... Cette expérience simple, que tout le monde peut faire, permet facilement d'isoler certains paramètres réglant la hauteur du son. Ainsi on peut "monter" le son de diverses manières :

- On fait "chanter" le ballon; un aide appuie brusquement sur le ballon. La pression augmente, le son monte; on peut faire le sonagramme (fig.7) et mesurer ou enregistrer la pression de façon précise. Conclusion : toutes choses égales, le son monte avec la pression.

- On allonge la "bouche", sans modifier le reste : on observe à partir de la position totalement détendue, une montée graduelle du son (fig.8). Quand on tire très fort, la raideur des lèvres se modifie simultanément, et, dans certains cas, on peut noter une baisse du son vers les grandes tensions. Cette apparente anomalie met en évidence l'influence de la raideur :

- Pour montrer le rôle de la raideur, reprenons le système normal embouchure-lèvres; il suffit tout simplement d'appuyer l'embouchure plus ou moins fort sur les lèvres. L'expérience montre alors que la hauteur varie avec la raideur du système. La figure 9 donne le sonagramme de l'expérience.

⊗ (ou d'écarter plus ou moins les dents...)

...../

Fig 7

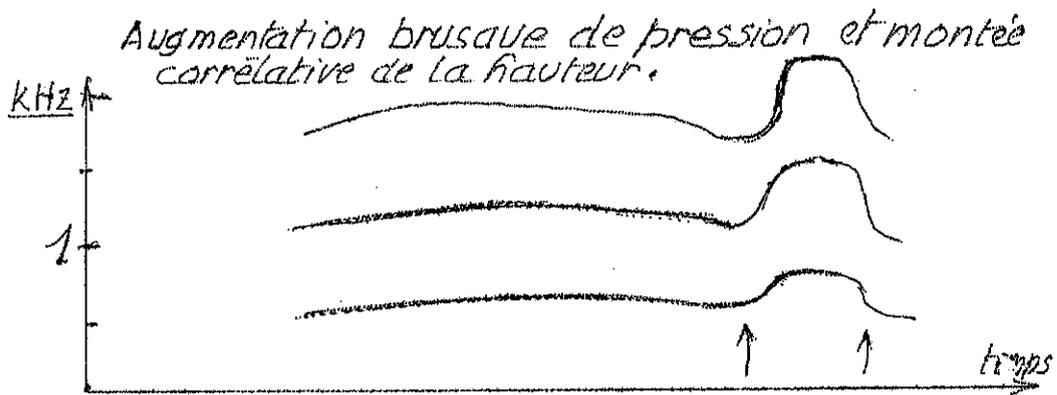


Fig 8

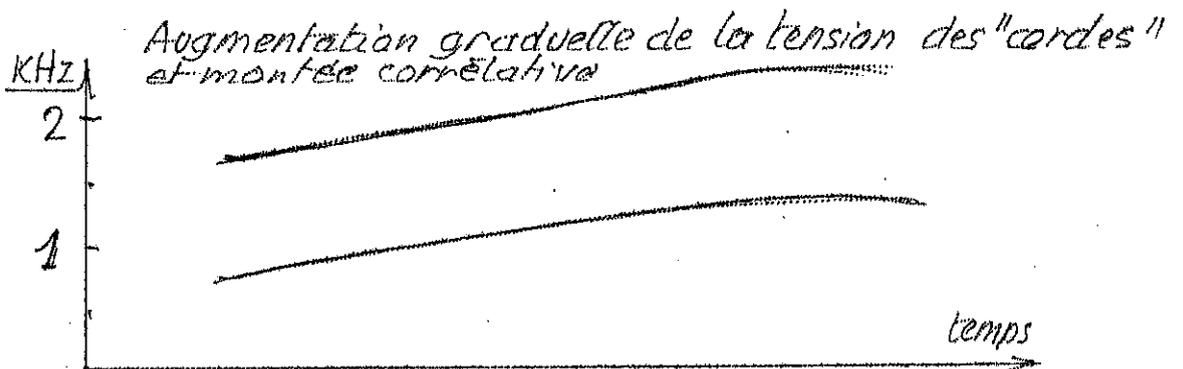


Fig 9

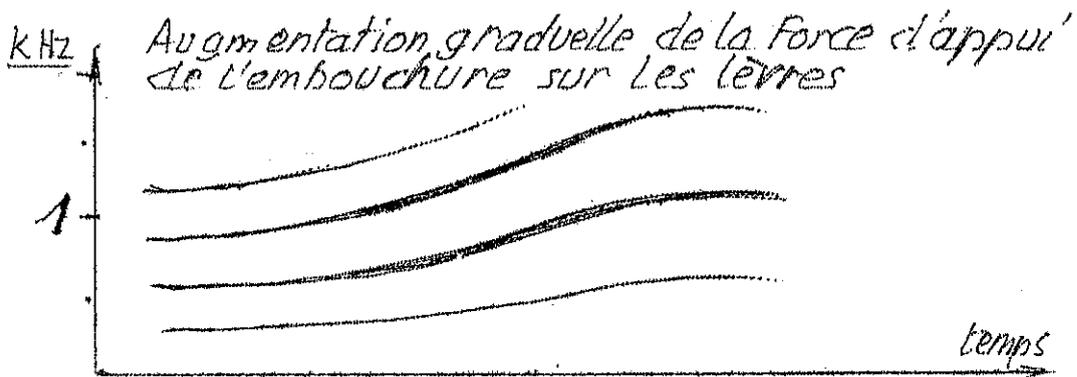
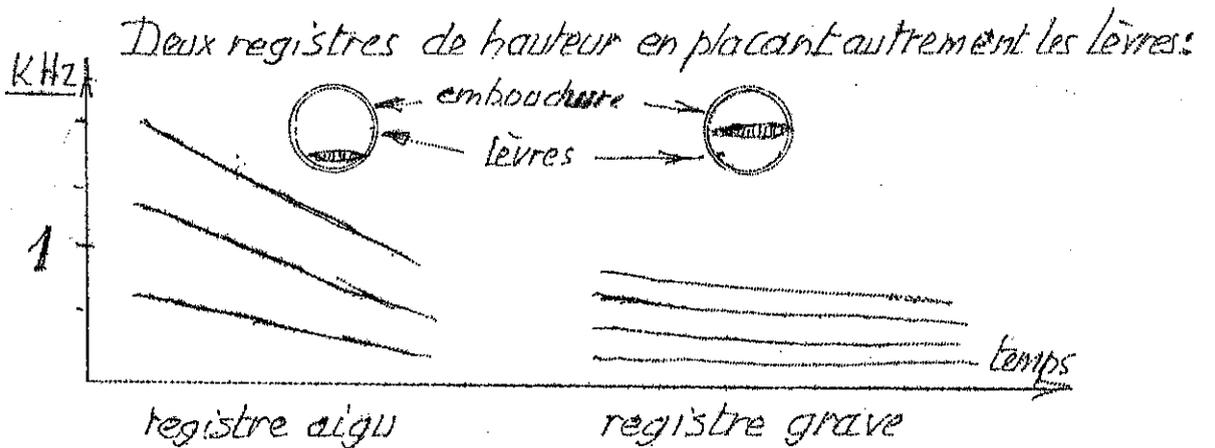


Fig 10



- Les musiciens savent qu'on peut aussi " gonfler " plus ou moins les lèvres, indépendamment des autres paramètres. Il savent aussi qu'avec des lèvres en lame de couteau on ne sera jamais un bon trompettiste Car l'augmentation de la masse vibrante par gonflement des muscles est nécessaire pour tenir des " graves " de bonne qualité. ob-

- On peut encore modifier la hauteur en changeant la forme de la fente; avec le ballon de baudruche c'est bien facile, et on constate des fluctuations de hauteur évidentes. L'expérience montrant accessoirement qu'il n'est absolument pas indispensable que les " lèvres " du système se rejoignent pendant la vibration pour qu'il y ait production du son. C'est bien évident ; refermer tant soit peu une ouverture signifie augmenter l'impédance du trou, donc créer une variation de pression, donc un son ...

En résumé, la hauteur peut être modifiée par divers paramètres isolément. Ainsi les trompettistes savent bien qu'on peut modifier la longueur vibrante des lèvres en les plaçant ^{soit} au milieu de l'embouchure, soit vers le bord (fig.10). Dans le premier cas on favorise le grave, dans le second on favorise les aigus. On montre facilement qu'un même système lèvres-embouchure excité en glissando permet, selon le cas, un registre plus aigu ou plus grave (Fig.10 a). Si on se propose d'exploiter toute l'étendue possible, on aura évidemment à changer la position des lèvres en cours de route, ce qui provoquera une solution de continuité dans le jeu. Ce " passage " est facile à percevoir à l'oreille si on tente le glissando continu ... mais non moins facile à dissimuler si on joue des notes isolées séparées par une certaine durée..

Dans la réalité, le musicien monte toujours le son en jouant sur deux ou plusieurs paramètres simultanés; il est possible ainsi de couvrir une étendue plus grande sans " passage ". On peut même, agir simultanément sur tous les paramètres (pression, longueur, raideur, masse etc...) et couvrir ainsi une étendue maximum avec le système considéré, sans aucun passage perceptible... Le passage serait alors un défaut, un manque d'entraînement à coordonner la musculature compliquée qui intervient ici. Cet entraînement est en fait l'essentiel de l'apprentissage du jeu de l'instrument à embouchure de cor, régler la hauteur étant un point capital en musique. Mais l'intensité aussi doit pouvoir être dosée à volonté !

b) INTENSITE . L'intensité d'un signal acoustique perçu dépend de la variation périodique de pression au niveau du grain d'orge, c'est-à-dire, au départ, de la pression en amont de la lèvre. Quand l'obturation par les lèvres est totale, la pression d'air pulmonaire se stabilise à un maximum; à l'ouverture totale des lèvres, elle tombe au minimum, voisin de la pression atmosphérique. Ce cycle répété périodiquement, détermine la pression acoustique, le niveau, que

.... /

nous pouvons mesurer avec le décibel-mètre. Il est évident que si l'obturation des lèvres n'est pas totale, le maximum ci-dessus ne sera jamais atteint au départ; le niveau sera plus faible, mais ceci n'empêche nullement des variations de pression périodiques, donc la production d'un son. L'intensité du son rayonné par l'excitateur lèvre-embouchure dépend donc pour commencer de la capacité musculaire d'occlusion des lèvres. Elle dépend aussi, bien entendu de l'amplitude des lèvres, puisque la variation de pression est liée à la section !

Mais lorsqu'apparaît le mot " intensité ", de quoi parle-t-on ? De la pression acoustique ? Alors il ne faut pas oublier un point d'importance capitale, découlant des propriétés de l'oreille relativement à la perception des hauteurs (diagramme de FLETCHER), à savoir que l'oreille est beaucoup plus sensible autour de 2000 Hz qu'à 30 Hz ou 10 000 Hz. La différence atteint 60 dB au seuil ! Il résulte de cela qu'un son sinusoïdal (simple) de 100 Hz d'un niveau de 80 dB "sonne" beaucoup plus faiblement qu'un son très riche en harmoniques de même niveau. Donc l'intensité dépend du spectre, c'est-à-dire du timbre, et tout ce qu'on a dit sur l'intensité du son ne signifie rien si on n'a pas précisé au départ la composition spectrale du signal.

c) LE TIMBRE. Nous avons déjà insisté ailleurs sur le fait que le mot " timbre " recouvrait un phénomène complexe régi par un assez grand nombre de variables. Sans entrer dans le détail, rappelons que certaines particularités du timbre dépendent du transitoire d'attaque. Ainsi, une attaque très graduelle donne un timbre doux; une attaque brutale, c'est-à-dire intense et très brève, donne un timbre " mordant ". Or nous avons bien vu plus haut le rôle de la cuvette et de l'impédance du grain d'orge sur la rapidité d'établissement du régime - donc sur le transitoire, donc sur le timbre ...

Mais la richesse du timbre dépend de la composition spectrale. Comment celle-ci est-elle déterminée dans le système excitateur qui nous intéresse ici ? Tout simplement par la loi de variation de pression au niveau du grain d'orge. Si la durée de la période détermine la hauteur du son, on peut avoir, pour une même période, une infinie variété de formes du signal. La plus simple est celle qui vient d'un système dont l'ouverture et la fermeture seraient absolument identiques au signe près et suivrait la loi la plus simple possible ; celle du mouvement sinusoïdal. Ici, la pression augmente puis décroît régulièrement selon la fonction bien connue. La courbe observée à l'oscillographe est alors une ondulation régulière (fig. 11 a) qui, sur le sonagramme, se traduit par une ligne unique, d'autant plus grosse que l'amplitude est plus grande. A l'oreille c'est un son " pauvre " (" sourd " lorsqu'il s'agit d'un son grave)

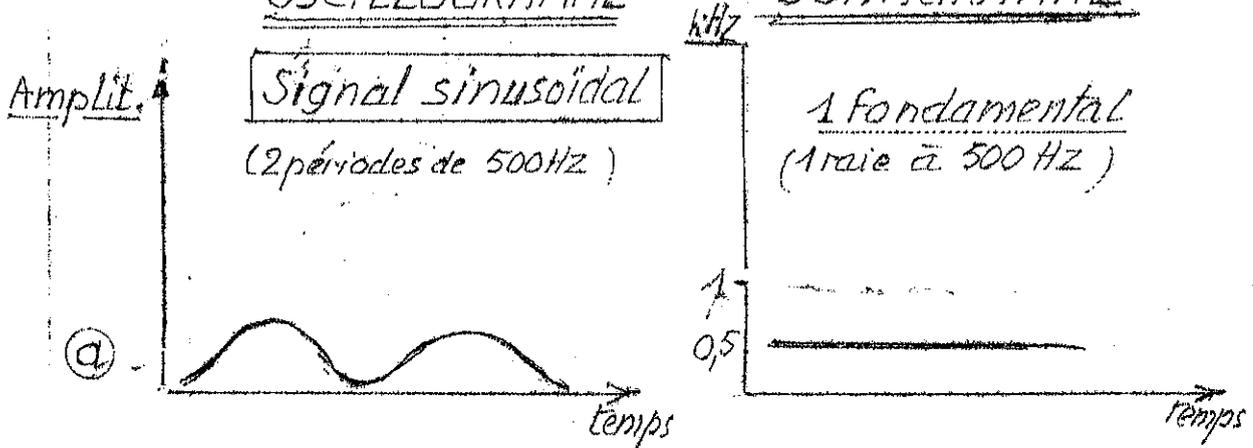
Mais on peut aussi imaginer un dispositif, une "vanne"

...../

Fig. 11

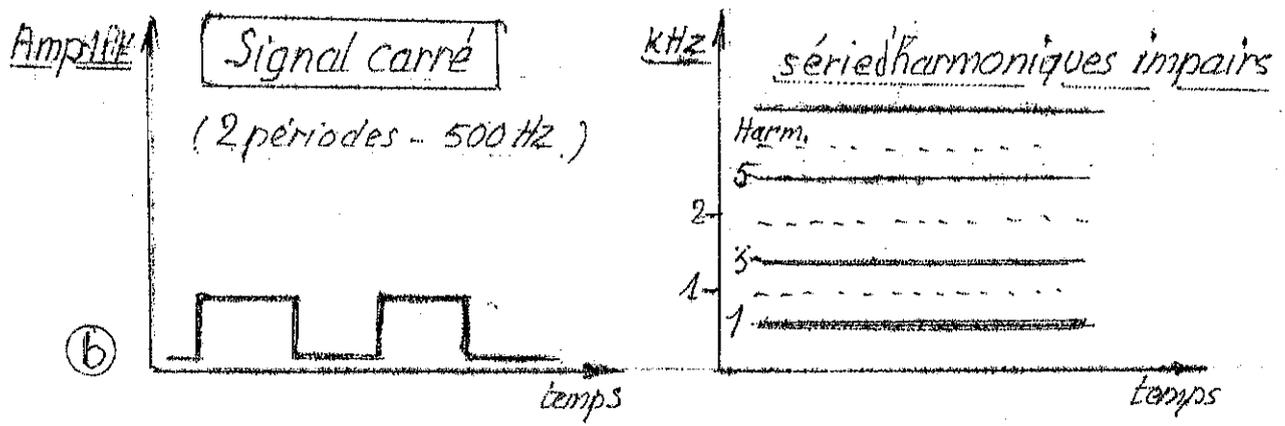
Correspondance schématique

l'OSCILLOGRAMME et son SONAGRAMME



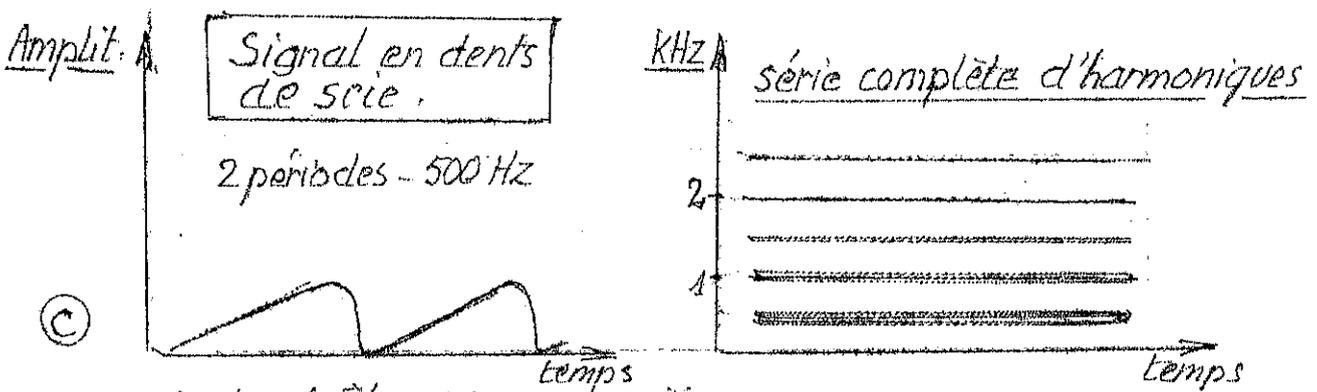
l'amplitude varie selon la loi sinusoïdale.

On a une raie spectrale dont la grosseur est fonction de l'amplitude.



C'est par exemple une vanne à ouverture et fermeture instantanées

harmoniques 1-3-5 etc.



ce peut être une vanne à ouverture lente et fermeture instantanée (ou inverse)

tous les harmoniques

à établissement et coupure périodique de pression instantanés. L'oscillogramme affecte alors la forme d'une ligne brisée à angles droits. C'est le signal "carré", dont on sait qu'il ne contient en principe que les harmoniques impairs (fig. 11b); le sonagramme montre clairement cette particularité.

Enfin la pression peut s'établir lentement et s'annuler quasi instantanément : ouverture graduelle d'une vanne et fermeture brutale. L'analyse mathématique de ce mouvement indique l'existence d'une somme d'harmoniques de tous rangs et d'intensité décroissante. Ce mouvement est une "oscillation de relaxation"; il apparaît sur l'oscillographe comme une "dent de scie" et le sonagramme (fig. 11c) montre bien qu'on est en présence d'un son riche contenant les harmoniques de tous rangs.

Insistons sur le fait que dans un mécanisme matériel, ces courbes ne peuvent exister à l'état pur en raison de l'inertie ; le mouvement d'un système mécanique n'est donc jamais strictement sinusoïdal. Si on ne peut imaginer des durées d'établissement ou d'arrêt nulles, elles peuvent cependant être plus ou moins brèves. En fait les dents de scie et les signaux carrés sont plus ou moins nets, mais dans tous les cas, le sonagramme nous renseigne instantanément sur l'allure du mouvement : le spectre d'un son trahit donc la loi de variation de pression, donc le mécanisme du système générateur

Les sonagrammes que nous avons donnés plus haut pour le signal des lèvres seules, ainsi que celui du système lèvres-embouchure montrent la présence manifeste d'une série harmonique complète. Conclusion, le mouvement est en dents de scie et il s'agit d'une oscillation de relaxation. Cette conclusion est entièrement corroborée par les diagrammes de D.W. MARTIN, qui montrent précisément la dissymétrie du mouvement : durées d'ouverture différentes de celle de la fermeture.

Une expérience plus poussée montrerait qu'avec une grande force d'appui des lèvres l'une sur l'autre le système met plus de temps à s'ouvrir qu'à se refermer - et inversement. Entre les deux cas, il peut exister une position moyenne, où le mouvement se rapproche du mouvement simple et symétrique. En d'autres termes, la loi de variation de pression, donc d'enrichissement du timbre, est fonction de la force d'accoulement des lèvres. Plus la surface commune est petite, plus le mouvement tend vers la forme sinusoïdale; à la limite, les lèvres ne se touchent plus, mais vibrent tout de même : le son est le plus sinusoïdal possible, le timbre le plus pauvre possible. En d'autres termes, le musicien, en réglant la force d'appui interlippale joue à volonté sur la forme vibratoire, c'est-à-dire sur la composition spectrale, c'est-à-dire sur le timbre - et corrélativement sur le niveau. Ceci dans les limites de fonctionnement physiologiquement possibles.

.... /

Il va sans dire que la muqueuse joue dans cette affaire un rôle énorme ; plus elle est souple et nerveuse dans ses mouvements de glissement, plus on tend vers un mouvement dissymétrique, donc un son riche ; elle joue le même rôle d'intermédiaire que la colophane dans le violon. Tous les candidats de trompette au Conservatoire savent qu'il ne faut jamais manger de salade avant un concours ou une exécution ; en effet, la lubrification des lèvres est défavorable à la relaxation, donc à la production des sons riches en harmoniques que l'on recherche.

En réalité, le musicien agit sur le timbre non seulement par réglage de la surface et force d'appui des lèvres et par la pression, mais aussi en jouant sur des combinaisons musculaires compliquées dont il n'est certainement pas toujours conscient, mais qu'il apprend à réaliser de façon optimum en fonction du résultat esthétique recherché. Il est certain que le mouvement des lèvres représente un phénomène très compliqué ; et non seulement le mouvement transversal des lèvres importe, mais aussi le mouvement dans l'axe, vers l'avant, qui est manifestement aussi une oscillation de relaxation, comme le montrent d'ailleurs les diagrammes de D.V. MARTIN.

Maintenant que nous avons une vue d'ensemble du mécanisme et de l'acoustique du système excitateur lèvres-embouchure, il convient de donner quelques précisions sur le fonctionnement et le rôle des " corps sonores " associés à de tels excitateurs.

4°) LES " CORPS SONORES " aériens et leur couplage avec l'excitateur.

Parmi les instruments de musique traditionnels, on trouve des excitateurs lèvres-embouchure associés à des " colonnes d'air " de formes variées à l'infini, mais en fait il existe deux cas distincts dont il convient de dire quelques mots : celui des tuyaux et celui des résonateurs.

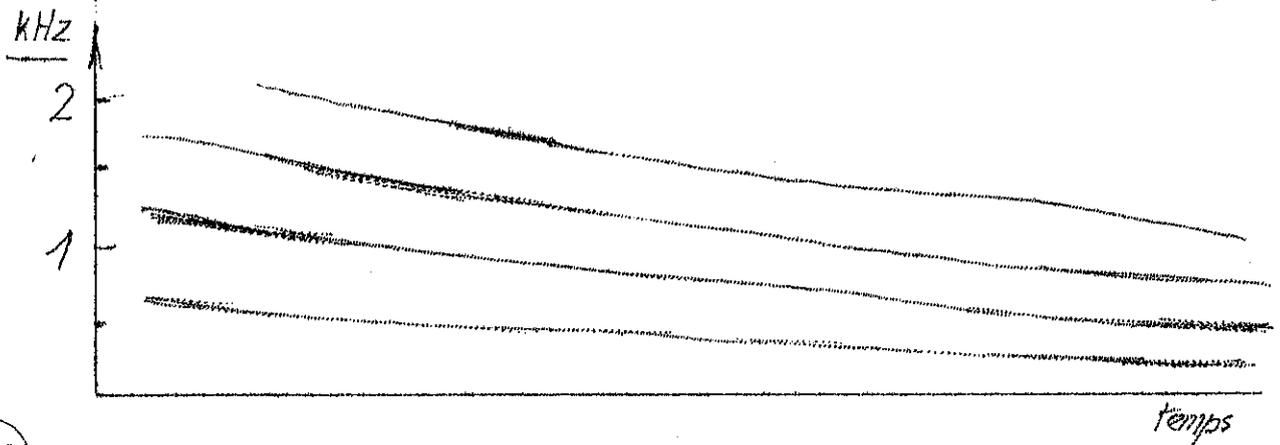
1°) LE TUYAU. Un tuyau isolé est caractérisé musicalement par sa " taille " (rapport longueur/diamètre) et sa forme géométrique en général bien définie.

On sait que la " colonne d'air " délimitée par le tuyau peut être mise en vibration de diverses manières. Donnons par exemple le tuyau d'une embouchure de flûte, et augmentons graduellement le souffle. A un point donné on produit une note musicale, la plus grave possible, où la colonne d'air vibre sous son régime le plus simple, le régime 1 appelé aussi régime fondamental.

Augmentons le souffle ; la colonne d'air se divise subitement en deux parties ; on saute à une note beaucoup plus aigüe ; le partiel 2. En continuant l'expérience on saute

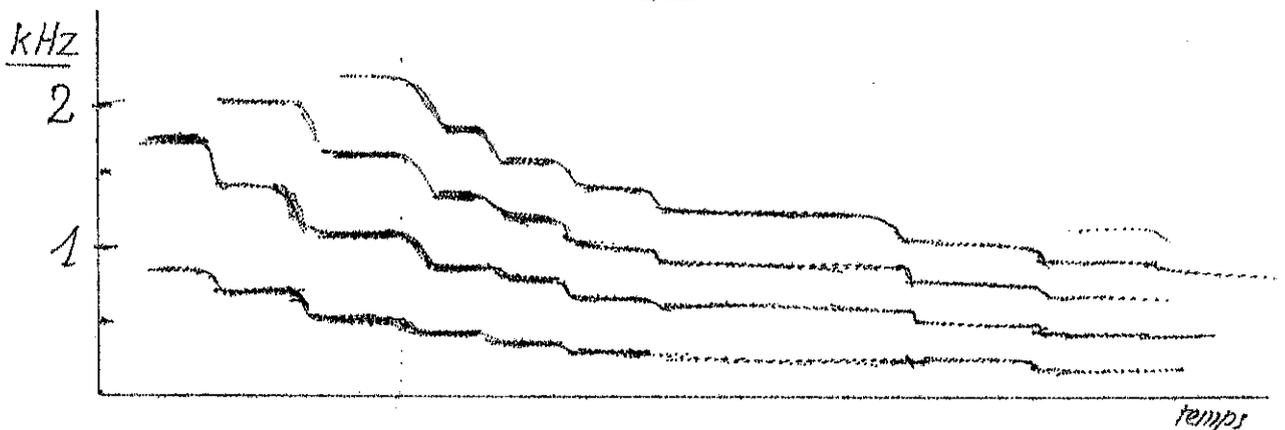
...../

a) EMBOUCHURE SEULE (glissando descendant)



(Fig 12)

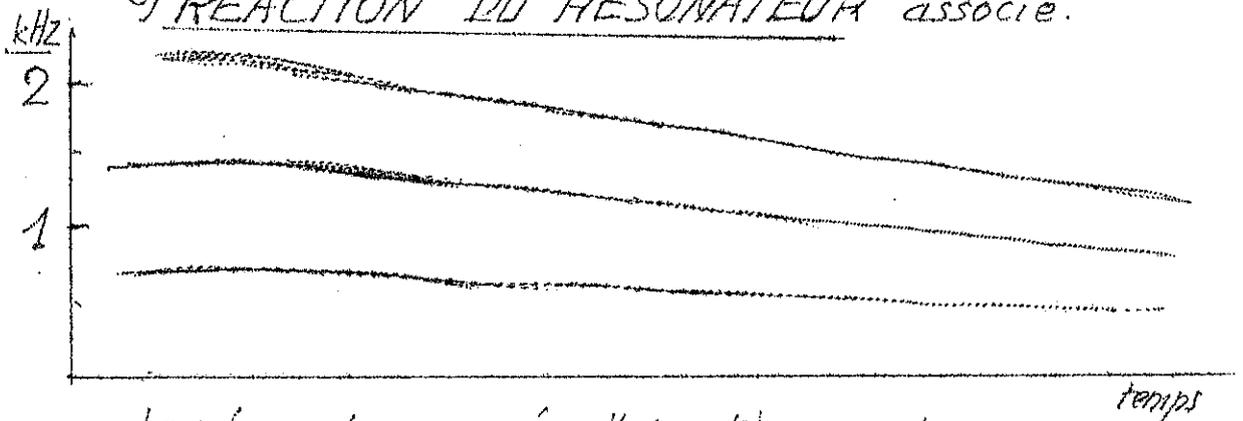
b) RÉACTION DU TUYAU associé.



On a des "sauts" plus ou moins raccordés correspondant aux régimes du tuyau.

(Fig 13)

c) RÉACTION DU RÉSONATEUR associé.



Le résonateur ne réagit pratiquement pas : on peut faire un glissando en continu.

de même, successivement aux partiels 3, 4 etc...

La théorie élémentaire admet que, le tuyau se décomposant en 2, 3, 4 parties on double, triple, quadruple ... la fréquence du fondamental. En bref on produirait une série harmonique, où, par définition, les fréquences sont des multiples entiers de celle du fondamental. L'expérience montre cependant que la série des partiels peut s'écarter considérablement d'une suite harmonique; l'écart varie avec la forme, la taille, les dimensions du tuyau. On a parfois tenté d'expliquer l'écart par les conditions aux extrémités, en introduisant une formule de " correction au bout ", déterminée empiriquement par des expérimentateurs comme CAVAILLE COLL; mais tout cela reste valable pour des limites étroites de tuyaux; en fait, ce qui se passe aux extrémités d'une flute réelle ou d'une clarinette reste à définir on n'en connaît en fait que les effets et il faut se défier des " formules " simplistes proposées.

Il faut insister sur le fait que si une flute, une trompette, " donne " une série harmonique à peu près correcte - et sur les sons de laquelle le musicien peut d'ailleurs agir grâce au champ de liberté dont il dispose par action sur l'excitateur, c'est que le facteur a réalisé un tuyau généralement composité (cylindro-conique ou vaguement évasée sans qu'il s'agisse d'une forme simple) à la suite de longs tâtonnements empiriques. Les choses ne sont donc pas simples et nous ne pouvons plus nous émerveiller, comme RAMEAU, sur le fait que la flute donne " naturellement " les harmoniques du fondamental.

Tout ceci est connu; mais il faut insister une fois de plus sur un point de terminologie qui continue à créer des malentendus. Lorsqu'on excite le régime 1 on l'appelle " fondamental du tuyau ". Mais il faut bien se rappeler que cette note musicale comporte un " fondamental spectral ", accompagné d'une série d'harmoniques, justes par définition puisqu'il s'agit d'un son périodique (Loi de Fourier). Mais le partiel 2 du tuyau (régime 2) est également une note musicale comportant un fondamental (spectral) et une série d'harmoniques; de même les partiels 3, 4 etc... (fig.12). Nous insistons sur cette question parce que de regrettables confusions se perpétuent du fait que les musiciens emploient les mots " harmoniques ", " partiels " et " fondamentaux " avec des significations différentes de celles des physiciens.

Ceci étant précisé, que se passe-t-il quand on excite un tuyau à l'aide d'un système embouchure-lèvre ? Nous avons vérifié plus haut que nous pouvions faire un glissando en continu avec le système embouchure-lèvres. Essayons de faire de même après avoir associé l'embouchure à un tuyau. On observe alors que le glissando continu devient impossible : on passe brusquement, par sauts, à des " notes " musicales discrètes, dont on vérifie qu'elles correspondent aux partiels du tuyau considéré. Si on utilise alors un tuyau réalisé de manière que ses partiels correspondent à peu près à la suite

..../

des harmoniques " naturels ", nous pourrions jouer une musique qui nous est familière en Occident : c'est le cas du clairon, de la trompette, du cor des Alpes etc... Mais rien n'empêche de faire un tuyau produisant une autre suite de partiels..

En fait, on vérifie qu'un tuyau d'instrument de musique ne présente jamais un cas " pur " : c'est toujours une forme compliquée difficile à définir géométriquement, mais qui correspond acoustiquement à quelque chose de très précis.

2°) CAS D'UN RESONATEUR : Un résonateur est une cavité plus ou moins quelconque, qui possède aussi un régime fondamental et des partiels si on les excite convenablement. La fréquence la plus grave du système ne dépend plus de sa longueur, mais du volume et de la section des ouvertures. Autre particularité : le partiel 2 est généralement beaucoup plus loin que l'octave et demande beaucoup d'énergie pour être lancé.

Mais, ce résonateur est susceptible de " colorer " un bruit d'écoulement. Autrement dit, avec un résonateur, excité par un système excitateur trop faible pour lancer le régime vibratoire on verra le signal de l'excitation se colorer dans la région correspondant à sa fréquence propre. Dans ce cas, ce n'est plus le " corps sonore " qui impose la fréquence à l'excitateur : c'est ce dernier qui détermine la hauteur du son. Effectivement, l'expérience vérifie qu'un système embouchure-lèvres, couplé à un résonateur, permet de faire en continu un glissando allant du grave à l'aigu, tout comme l'embouchure seule permettrait de le faire (fig.13).

Comme instruments de musique à vent utilisant un résonateur, on ne connaît que peu de types; c'est par exemple l'ocarina (avec embouchure de flûte); c'est aussi le " serpent " dont il convient de dire quelques mots.

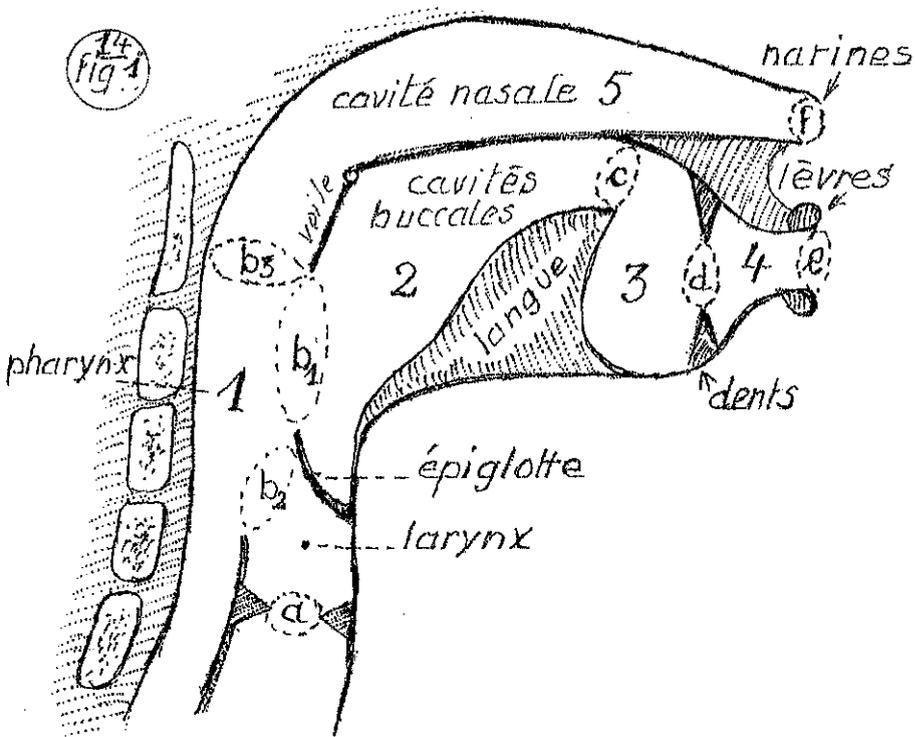
Le serpent comporte une grande embouchure, type "tuba", et un corps sonore vaguement conique, assez évasé et replié en forme de serpent. MERSENNE parle longuement de l'instrument, qui permettait d'obtenir des " basses " en musique d'église, remplaçant, il n'y a pas encore si longtemps, soit les voix masculines soit l'orgue.

Le serpent est doté de 6 trous; mais on vérifie que pour une position donnée, on peut monter le son " aux lèvres " d'au moins une quinte. C'est donc bien que la réaction du tube est faible et qu'il joue plutôt le rôle d'un résonateur. Le musicien doit donc avoir dans la mémoire la hauteur à réaliser, et régler sa musculature lippale en conséquence, sinon il jouera faux.

Si cette famille d'instruments ne comporte pas beaucoup de membres, il en est cependant un qui est bien connu de tous : c'est l'appareil phonatoire humain !

...../

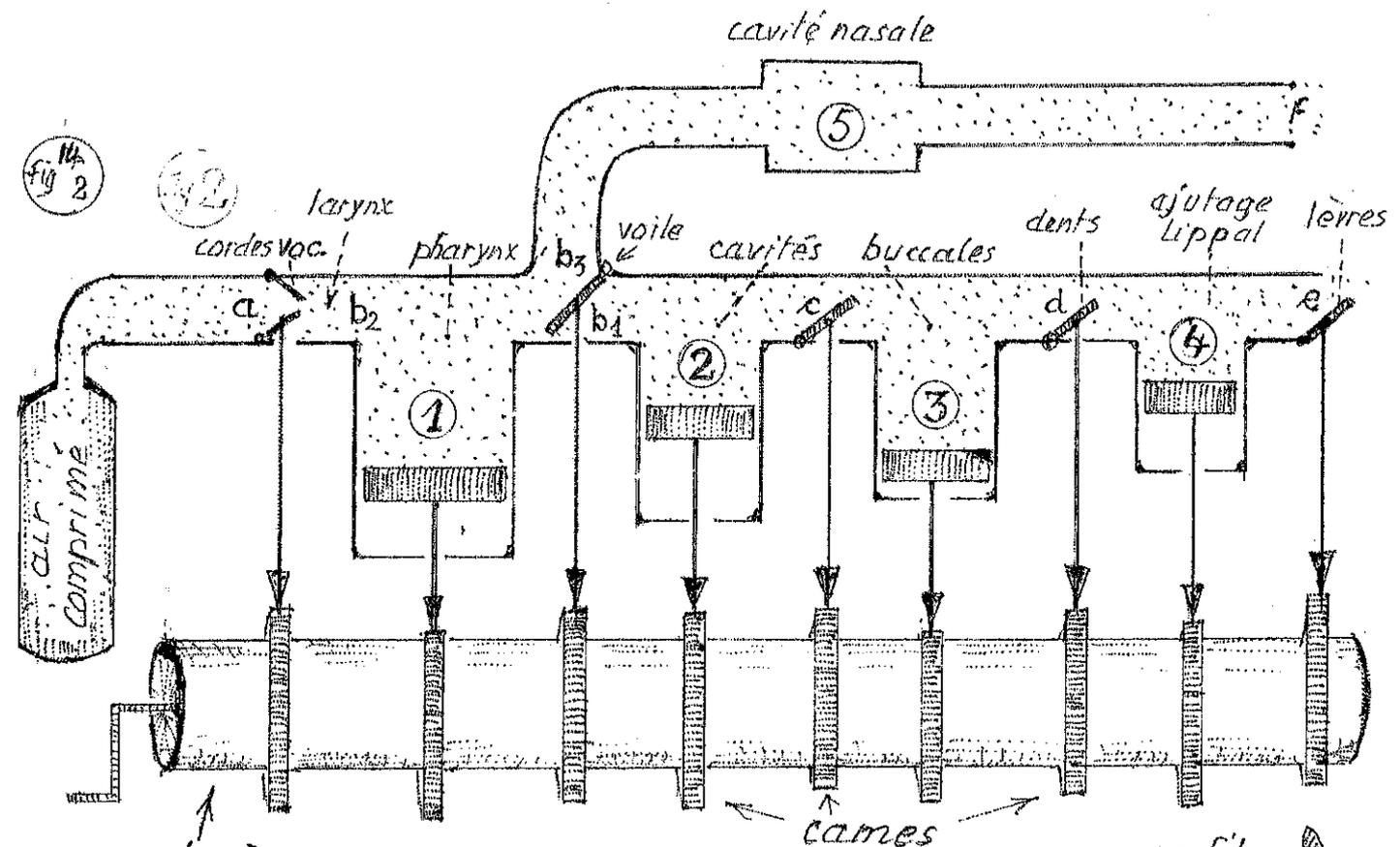
14
fig 1



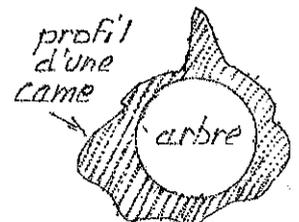
SCHEMA DE L'APPAREIL PHONATOIRE.

L'appareil phonatoire comporte une série de cavités couplées de différentes formes, de volume et de sections d'ouverture variables; l'ensemble constitue un résonateur complexe qui peut être obturé à divers niveaux (a, b, c, d, e). Le fonctionnement de l'ensemble est clairement mis en évidence par le modèle mécanique ci-dessous.

14
fig 2



arbre à cames = programme.
Chaque came représente le mouvement d'un organe: vanne réglant les ouvertures, pistons réglant les volumes des cavités.



III - L'APPAREIL PHONATOIRE HUMAIN ET SON FONCTIONNEMENT

1°) DESCRIPTION.

Comme tout autre instrument de musique, l'appareil phonatoire est une machine à fabriquer des différences de pression. Les travaux que nous avons en cours sur les problèmes de synthèse de la parole nous ont fourni l'occasion, à maintes reprises, de proposer un schéma de fonctionnement de l'appareil phonatoire qu'il est intéressant de reprendre ici, pour bien poser le problème (fig.14).

Le système comprend d'abord une soufflerie fournissant l'énergie nécessaire sous forme d'air comprimé (fig.14-1). Le système excitateur (a) est représenté ici par les cordes vocales. Le système " résonateur " est en fait composé d'une série de cavités couplées en série ; pharynx (1), cavités buccales (2 et 3), ajutage lippal (4), et d'une cavité en parallèle, la cavité nasale (5). Toutes ces cavités sont des résonateurs de forme, de dimensions et de section d'ouvertures variables dans une large mesure, isolément, conjointement ou simultanément. Le système est très élaboré, car on peut déformer les résonateurs, produire des occlusions en divers points, donc des explosions etc...

On pourrait imaginer une machine analogue (fig.14-2) et simuler les fonctions de l'appareil phonatoire avec des moyens mécaniques classiques : de l'air comprimé, un excitateur (système d'anches à fréquence variable, a), une série de résonateurs réglables par des pistons (1,2,3,4), un résonateur fixe en parallèle (5), et enfin une série de " vanes " permettant d'obturer le système en un point donné. Chaque organe est commandé par une came de profil donné. L'ensemble des cames, placé sur un arbre, représente un programme de mouvements, qui peut être aussi compliqué qu'on le désire. On pourrait facilement rajouter une série de cames réglant encore les ouvertures entre organes différents. Un tel " instrument " est susceptible de produire exactement les mêmes phénomènes que l'appareil vocal normal : c'est une machine à parler ou à chanter. Il ne s'agit pas d'une plaisanterie, puisque KEMPELEN a réalisé une telle machine. Celle-ci, il est vrai, était assez rudimentaire ; elle ne comportait qu'une anche de hauteur fixe et une seule cavité réglable. Telle qu'elle était, elle permettait cependant d'articuler quelques mots. J. S. LIENARD a reconstruit cette machine sur les données laissées par KEMPELEN, et nous la présentera à une réunion ultérieure du GAM.

Du schéma de fonctionnement précédent; passons maintenant à la réalité, et voyons d'un peu plus près la description de l'instrument : excitateur et " corps sonore ".

...../

2°) L'EXCITATEUR ET SA " MECANIQUE ". C'est le système du larynx avec les cordes vocales.

Nous n'avons pas l'intention ici de faire l'anatomie détaillée de cet organe; on trouve pour cela d'excellents traités, dont les " classiques " que nous avons consultés (bib. 5,6 et autres). Il convient cependant de conserver le nom des organes nécessaires et suffisants pour expliquer le mécanisme du système générateur de signaux acoustiques. Nous avons systématiquement supprimé toute la musculature extrêmement complexe pour ne conserver que la notion de " champ de liberté " des mouvements des cartilages etc... " Pour que tout soit bien clair, donnons successivement une coupe verticale, une coupe horizontale et une vue perspective du système.

a) Coupe verticale vue de face (fig.15). Le système des " cordes vocales " est constitué par une membrane élastique recouverte d'une muqueuse, et qui s'épaissit en deux replis : les bandes ventriculaires (appelées aussi cordes vocales supérieures, mais nous préférons ne pas utiliser ce terme qui peut introduire des ambiguïtés), et les cordes vocales, proprement dites. Entre ^{de chaque côté} bande ventriculaire et corde vocale il existe une cavité, plus ou moins marquée : le ventricule de Morgagni. Une musculature très compliquée peut agir sur les cartilages et déformer le système dans une très large mesure : les bandes ventriculaires et les cordes vocales peuvent se rapprocher, s'écarter, se gonfler, s'arrondir etc...; les ventricules de Morgagni peuvent se rétrécir, s'allonger, l'ouverture entre cordes vocales (glotte) ou bandes ventriculaires peut varier, etc.. On ne peut manquer d'être frappé par la similitude absolue entre ce système et le système excitateur lèvres-embouchure de cor décrit plus haut ... Avec, cependant deux avantages extraordinaires dans le cas des cordes vocales :

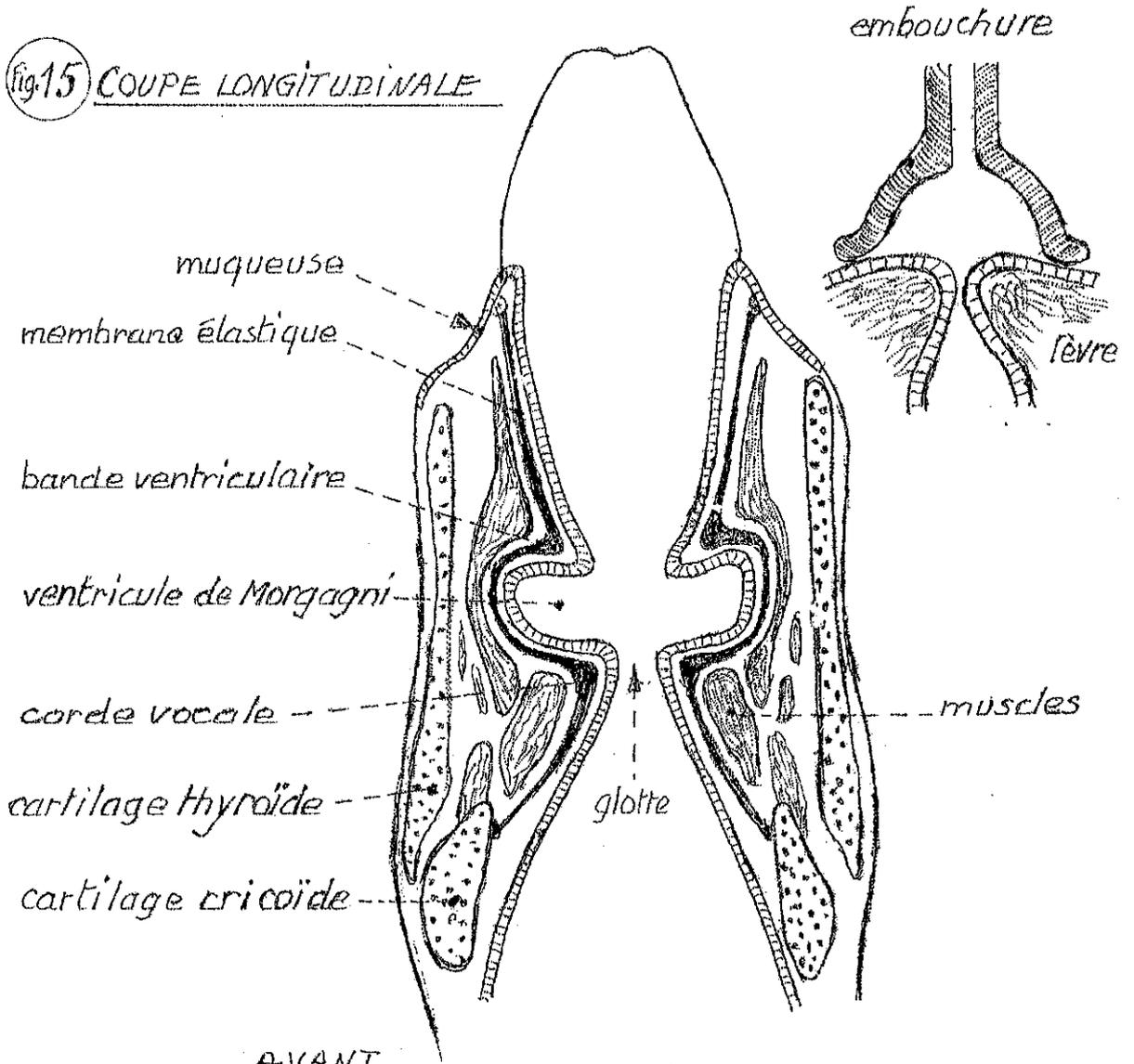
- l'embouchure n'est pas fixe. La " cuvette " est réglable très largement (en profondeur et en forme) ainsi que la section d'ouverture entre les bandes ventriculaires (correspondant au grain d'orge de l'embouchure instrumentale). Avec le système unique du larynx, il est donc possible de faire tout ce qu'on réalise avec toute une série d'embouchures - ce que la pratique vérifie.

- le système des cordes vocales est beaucoup plus élaboré que celui des lèvres, et permet des mouvements beaucoup plus variés; et cela en raison des particularités anatomiques et musculaires que met en évidence la coupe horizontale faite au niveau des cordes vocales.

b) Coupe horizontale (fig.16). On y distingue une série de cartilages : l'éthyroïde avec la " pomme d'Adam " vers l'avant (en haut sur la figure), le cricoïde, et les deux

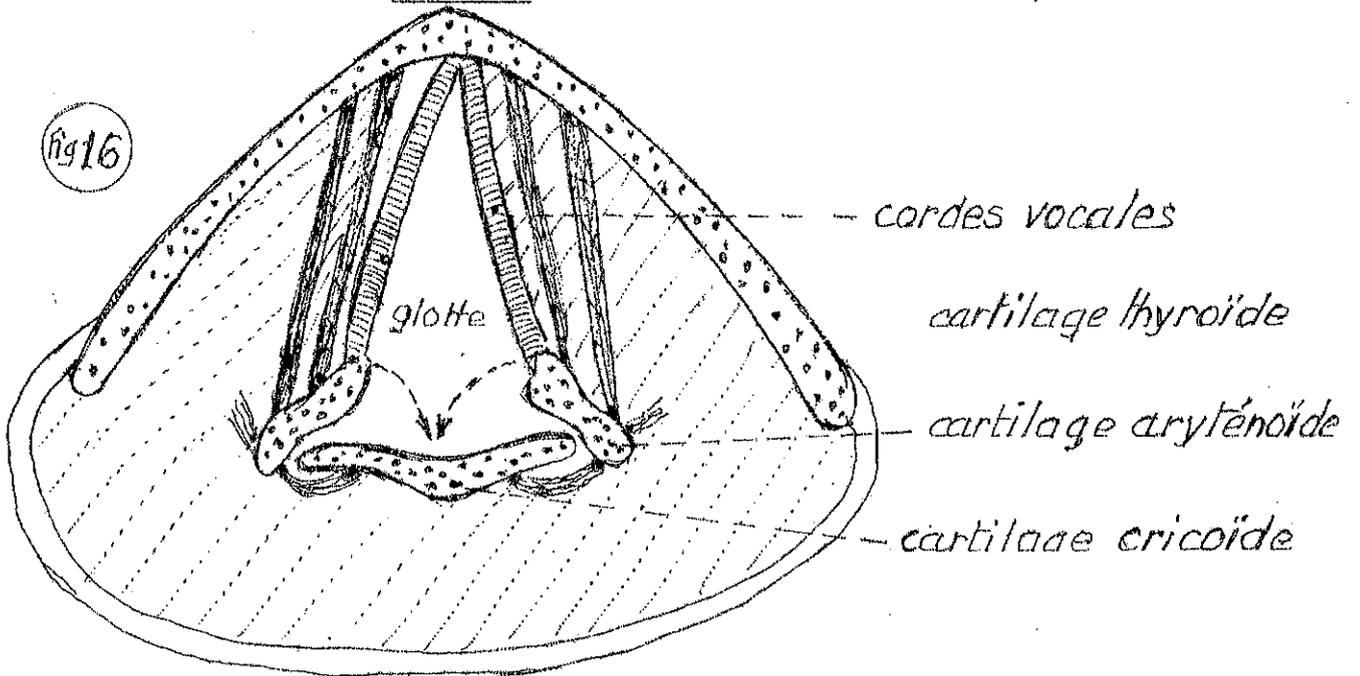
...../

fig.15 COUPE LONGITUDINALE



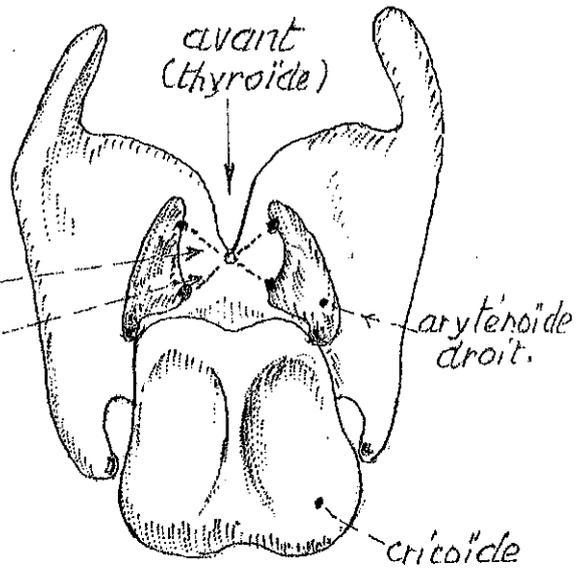
AVANT

fig.16



COUPE HORIZONTALE AU NIVEAU DES CÔRDES VOCALES

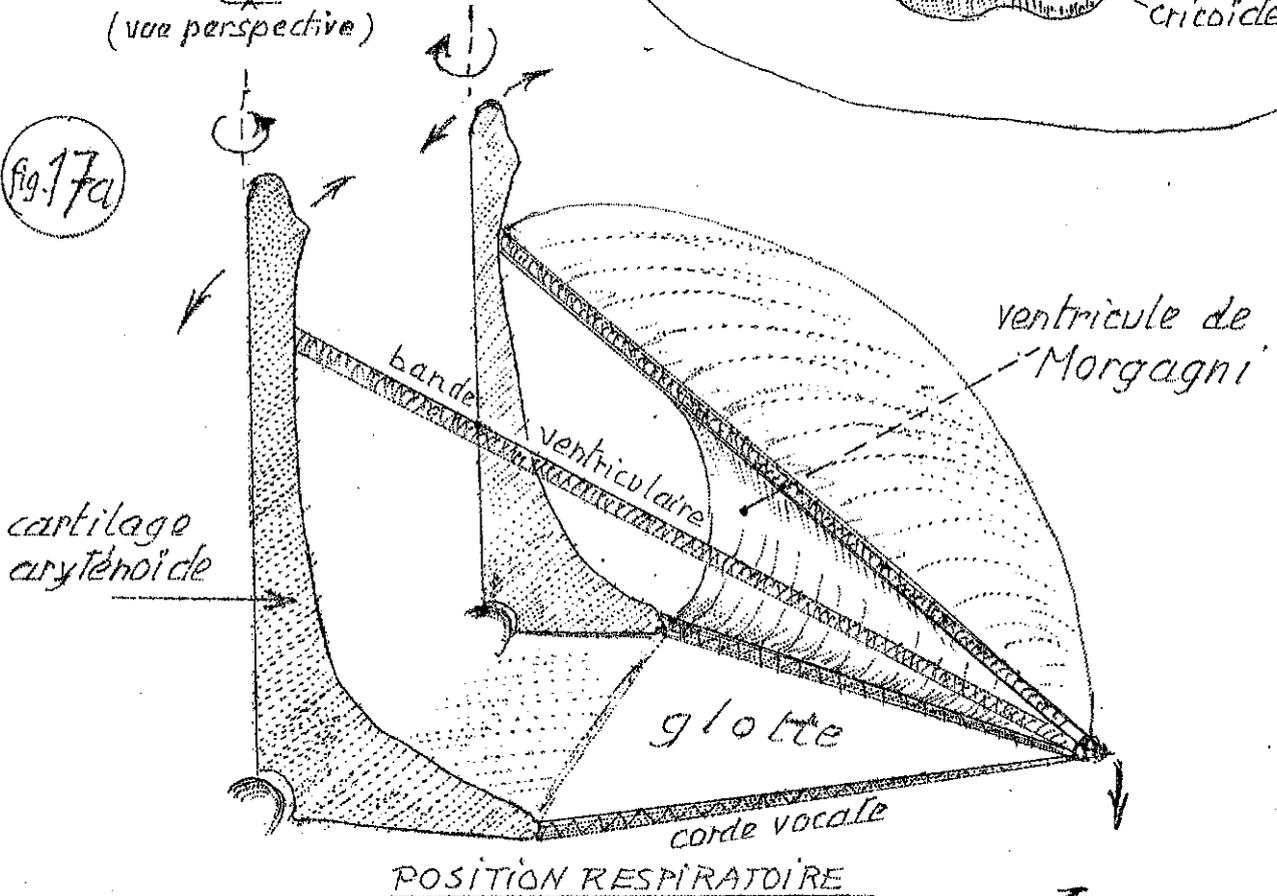
Les cartilages du larynx
dans la réalité
(vus de l'arrière)



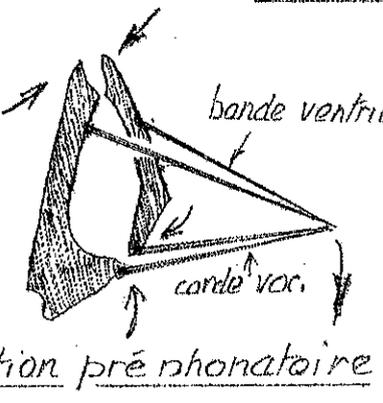
SCHEMA DE FONCTIONNEMENT
des cartil. aryténôïdes

(vue perspective)

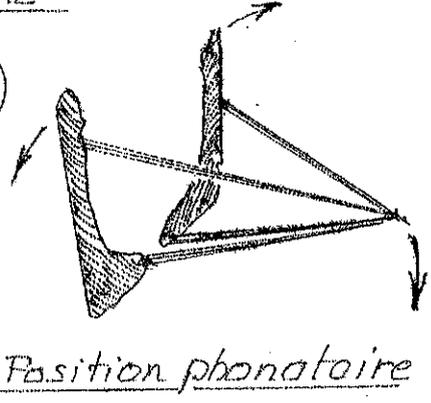
fig. 17a



17b



17c



aryténoïdes qui s'appuient sur ce dernier, ^{Bandes ventriculaires} et cordes vocales sont fixées au thyroïde et aboutissent à une apophyse des cartilages aryténoïdes. Toute une série de muscles permet de déformer le système :

- le thyroïde peut basculer vers l'avant, tirant alors sur les cordes vocales qui s'allongent.

- les aryténoïdes peuvent s'ouvrir et se fermer comme une porte double, réduisant ainsi graduellement la glotte.

En fait les cricoïdes sont montés sur l'aryténoïde par une véritable rotule, qui permet des mouvements très variés, dont une coupe perspective rend mieux compte.

c) Vue perspective (fig. 17). Représentons la coupe des aryténoïdes au plan défini respectivement par le point de fixation à la rotule et les points de fixation des cordes vocales et bandes ventriculaires.

Les aryténoïdes peuvent à la fois tourner autour de leur axe vertical, et s'incliner plus ou moins dans toutes les directions, latéralement ou d'avant en arrière grâce à l'articulation en rotule.

On se représentera mentalement les ventricules de Morgagni comme deux petites poches entrouvertes dont les bords de fermeture sont respectivement une bande ventriculaire et une corde vocale.

Le dispositif prend trois positions caractéristiques, bien connues :

- une position de respiration, où bandes ventriculaires et cordes vocales sont écartées (17a) : l'air passe librement du haut en bas, ^(ou inversement) de part et d'autre des ventricules de Morgagni.

- une position de préphonation, où bandes ventriculaires et cordes vocales sont accolées (17b).

- une position de phonation (17c), où les bandes ventriculaires sont écartées, les cordes vocales étant plus ou moins jointives, et en état de vibration. Ceci du moins résulte des observations de voyelles tenues. Mais nous pouvons tenir pour assuré que les bandes ventriculaires " jouent " énormément lors de la phonation normale, et remplissent la fonction de " cuvette " et de " grain d'orge " assurant un lancement rapide du régime des voyelles et de certaines consonnes (coups de glotte). Les mouvements sont difficiles à observer en raison de la brièveté des phénomènes : quelques millisecondes pour certaines explosives.

..../

Nous voici donc en possession des éléments nécessaires pour comprendre le mécanisme d'ensemble et les possibilités du système excitateur vocal.

Un tel système fonctionne strictement de la même manière que le système lèvres-embouchure, et tout ce qui a été dit plus haut s'applique ici comme on va voir.

3°) ACOUSTIQUE DU SYSTEME EXCITATEUR VOCAL.

On vérifie d'abord que l'appareil phonatoire permet de faire toute une gamme de sons variables en hauteur, intensité et timbre. Etudions les paramètres en cause.

a) La hauteur. L'expérience montre qu'on peut la modifier en jouant isolément ou simultanément sur plusieurs variables du système. Ainsi pour " monter " le son, on peut :

- tendre davantage les cordes vocales, en basculant davantage le cartilage thyroïde vers l'avant. On verra un exemple précis plus loin.

- raccourcir les cordes vocales, la tension restant fixe.

- raccourcir et détendre simultanément les cordes

- raidir la musculature des cordes

- amincir les bords de cordes, c'est-à-dire diminuer la masse vibrante (en les appuyant moins fort l'une contre l'autre par exemple).

- augmenter la pression de l'air

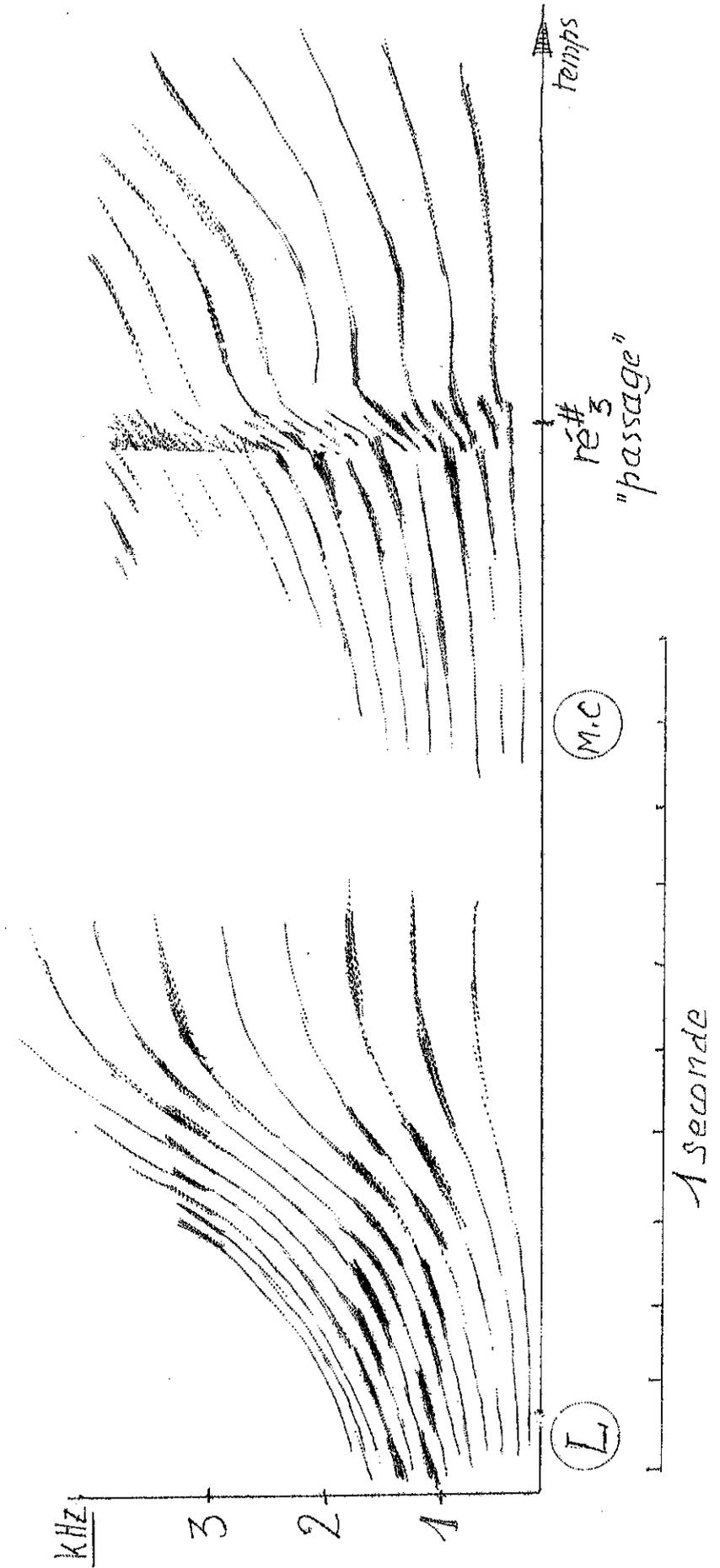
Tout ce qui a été dit plus haut sur la hauteur d'un système lèvres-embouchure de cor peut être repris. Nous apprenons intuitivement à régler toute la musculature pour varier la hauteur de notre voix pendant les premières années de l'enfance; mais il n'est pas du tout certain que chaque individu règle les mêmes paramètres et de la même manière. Il n'est pas douteux qu'un enfant apprenant à chanter tout jeune se " débrouille " pour régler la hauteur, en l'absence de sensation facilement localisable pour chaque paramètre isolé. Intuitivement chacun cherche à " monter " avec le minimum d'efforts musculaires (loi d'économie). Un tel qui possède des cordes vocales très souples, pourra couvrir grâce à elles un large champ de fréquences; tel autre qui est moins favorisé sur ce point pourra compenser par de meilleures performances d'enraidissement ou de pression etc... Chacun combine au mieux ses " dons naturels " pour aboutir au résultat désiré : monter la voix.

.... /

fig. 18

Deux exemples de glissando du grave vers l'aigu permettant de mettre en évidence les "passages".

Pour le sujet M.C. on observe un net "passage" vers le ré[#]₃.
Les régions formantiques sont très nettes chez le sujet L.



La hauteur de la voix ne joue en parole qu'un rôle tout à fait négligeable dans nos langues, du moins pour ce qui concerne la compréhension de l'information que l'on veut communiquer (information sémantique). Cependant le problème de la hauteur est capital dans le domaine du chant. Or il est évident qu'un individu n'ayant pas besoin d'une gamme de hauteurs bien grande pour parler, peut prendre de mauvaises habitudes de synchronisation de sa musculature laryngienne. Elles passent tout à fait inaperçues en parole normale. Mais si le même individu veut pratiquer le chant et exploiter toute l'étendue possible de sa voix, il aura des problèmes de " passages " ... En fait, on peut imaginer autant de ^{types de} passages qu'il y a d'associations deux à deux des paramètres déterminant la hauteur; passage tension-raccourcissement; passage tension-pression, passage tension-raïdissement etc... L'effet acoustique sera en gros le même; ce sera un " saut ", une solution de continuité, un " baffouillage " en un point donné, lorsqu'il s'agit de passer d'une certaine note à une note voisine. Cette note de passage peut être relativement fixe pour un individu, mais elle peut aussi varier si l'individu n'a pas un programme de régulation de tensions musculaires cristallisé.

Nous avons amorcé depuis longtemps une étude systématique de ce problème où, une fois de plus, la terminologie est très imprécise. En lisant les ouvrages sur la technique vocale du chant, on serait tenté de croire qu'il s'agit d'un phénomène ayant une cause unique, mystérieuse, alors qu'il peut manifestement exister plusieurs causes de nature différentes. Voici la méthode que nous utilisons :

- on demande au sujet de chanter en continu un glissement allant du son le plus bas possible au plus aigu; ceci sur diverses voyelles : "a", "o", "i", etc...

- on relève le sonagramme. Celui-ci est extrêmement parlant (fig. 18). En effet on y voit parfaitement les moindres solutions de continuité, sauts, passages de régime de cordes vocales etc.. En répétant plusieurs fois l'expérience avec le même sujet, on vérifie si son ou ses passages éventuels sont " cristallisés " sur une note donnée etc... Chanteurs et pédagogues du chant pourraient exploiter cette méthode simple et expéditive, qui permet à la fois de localiser avec précision un défaut et de contrôler, après rééducation, les progrès éventuels; car, puisqu'il s'agit de mauvais " programmes " de commande musculaire, il doit être possible de corriger les défauts lorsqu'ils existent, de les atténuer, de les supprimer. Nous pensons que la méthode ci-dessus conjointement avec les considérations sur le fonctionnement acoustique de l'excitateur vocal pourraient être d'un grand secours. L'utilisation d'une telle méthode permet, en tout état de cause, de comprendre ce qui se passe, et permettrait de trancher de nombreuses controverses où les affirmations tiennent trop souvent lieu de preuves.

Un cas typique est celui de la voix de tête et de fausset, qui sont le même phénomène, mais respectivement chez la femme et l'homme. Certains auteurs y ont vu une objection à la théorie myoélastique du système phonatoire : ils s'étonnaient de voir la voix monter, alors qu'ils observaient une décontraction simultanée de la musculature glottique. Or il suffit d'imaginer par exemple la combinaison simultanée : décontraction et raccourcissement de la partie vibrante, pour que tout devienne évident.

En bref, il ne semble véritablement pas qu'il y ait de mystère dans le fonctionnement et le rendement acoustique en hauteur de l'excitateur vocal : la combinatoire entre les paramètres réglant la hauteur permet d'expliquer toutes les observations faites sur ce point.

b) L'intensité. Le problème est simple si on pense au niveau physique (en décibels). Pour augmenter le niveau, il suffit, comme pour l'excitateur lèvres-embouchure, d'augmenter la pression ou l'amplitude des cordes vibratoires; les deux paramètres sont d'ailleurs liés. Rappelons que le niveau du signal produit dépend de la force musculaire des cordes pour contenir une pression sous glottique, car à l'origine, tout est fonction de cette pression. Le débit n'est pas nécessairement lié au niveau sonore. Pour un débit donné et une amplitude définie des cordes vocales, le niveau acoustique sera toujours plus fort si les cordes se ferment totalement que si elles vibrent entrouvertes à la même amplitude. Il n'y a donc nullement à s'étonner comme on le fait habituellement devant le " problème " du son filé !

Un son filé est un son de hauteur fixe que l'on amplifie graduellement du pianissimo au fortissimo. Le raisonnement que l'on a fait est le suivant :

" chanter piano dans l'aigu nécessiterait une forte pression sousglottique; mais un son de faible intensité nécessite un faible débit ". Forte pression et faible débit seraient inconciliables ". Le raisonnement est tout à fait incorrect : on peut chanter des notes aiguës, moyennes ou graves avec exactement la même pression sousglottique. Seulement lorsqu'on a épuisé les ressources de tous les paramètres de la hauteur, on peut encore " monter " un petit peu en " forçant " la pression. D'autre part il est inexact de dire qu'un son faible nécessite un faible débit : on peut émettre un son de même intensité et hauteur avec des débits tout à fait différents. Le débit est une question d'écartement de la glotte : nous avons montré plus haut pourquoi l'intensité (en niveau) n'était pas nécessairement liée de façon proportionnelle à ce paramètre.

De toutes façons, il aurait fallu préciser ce qu'on entendait par " intensité ", puisque le timbre y joue un rôle capital.

...../

c) Le timbre . On peut encore reprendre point par point ce qui a été dit sur l'excitateur lèvres-embouchure; nous n'insistons donc pas. Le timbre dépend de la loi de variation de pression à l'intérieur d'une période. Tous les paramètres qui jouent sur la loi du mouvement des cordes vocales interviennent donc, isolées ou simultanées, divergents ou convergents. Jouent donc un rôle aussi bien les bandes ventriculaires et les ventricules de Morgagni (sur les transitoires) que les cordes vocales, les dispositions et mouvements des cartilages, des muscles etc... On dispose de toute l'infinie combinatoire des dispositions naturelles et de l'entraînement systématique où interviennent de façon complexe toutes les variables du larynx : modification des dimensions des organes, modifications du tonus des muscles, changements de position etc... L'expérience montre que le chanteur habile contrôlant ses mouvements grâce au feed-back de l'oreille, sait parfaitement régler sa musculature, donc la forme oscillographique d'un son donné; en agissant sur les variables, produit toutes les formes acoustiques possibles entre la forme quasi-sinusoidale et la forme en dents de scie ; c'est cela enrichir le timbre, comme on peut le contrôler au sonagraphe.

4°) LE SYSTEME DES RESONATEURS VOCAUX ET SON COUPLAGE AVEC L'EXCITATEUR.

On retrouve encore ce qui a été dit plus haut au sujet du " serpent ", mais ici les cavités sont déformables à volonté. Avec les ouvertures variables, elles permettent de régler certaines zones de résonance, qui favoriseront telle ou telle composante du signal de l'excitateur vocal (formants). Les mouvements des cavités représentent bien entendu quelque chose de passablement compliqué, qui est stocké dans la mémoire lors de l'apprentissage de la parole et du chant, et qui " sort " comme " sous-programme " automatique. On n'oubliera pas le rôle des " vannes " pour produire à volonté des explosions variées, où des implosions d'une cavité dans l'autre. En résumé, le " corps sonore " de l'appareil phonatoire ne réagit guère sur l'excitateur. Il n'en modifie donc pas la hauteur ni la loi d'ouverture et de fermeture. Mais il " colore ", amplifie par résonance telle ou telle région du spectre délivré par le système excitateur des cordes vocales, permettant d'enrichir la gamme des signaux acoustiques rayonnés par l'appareil phonatoire.

..../

IV - LES SIGNAUX RAYONNES PAR L'APPAREIL PHONATOIRE
ET LEUR SIGNIFICATION

1°) TYPLOGIE ELEMENTAIRE DES SIGNAUX

Nous avons développé cette question ailleurs (bib.4b).
Résumons brièvement.

Tel qu'il est, l'appareil phonatoire permet de fabriquer isolément des signaux typiques et bien reconnaissables :
(fig.19)

Fig 19 Typologie des signaux élémentaires de la phonation

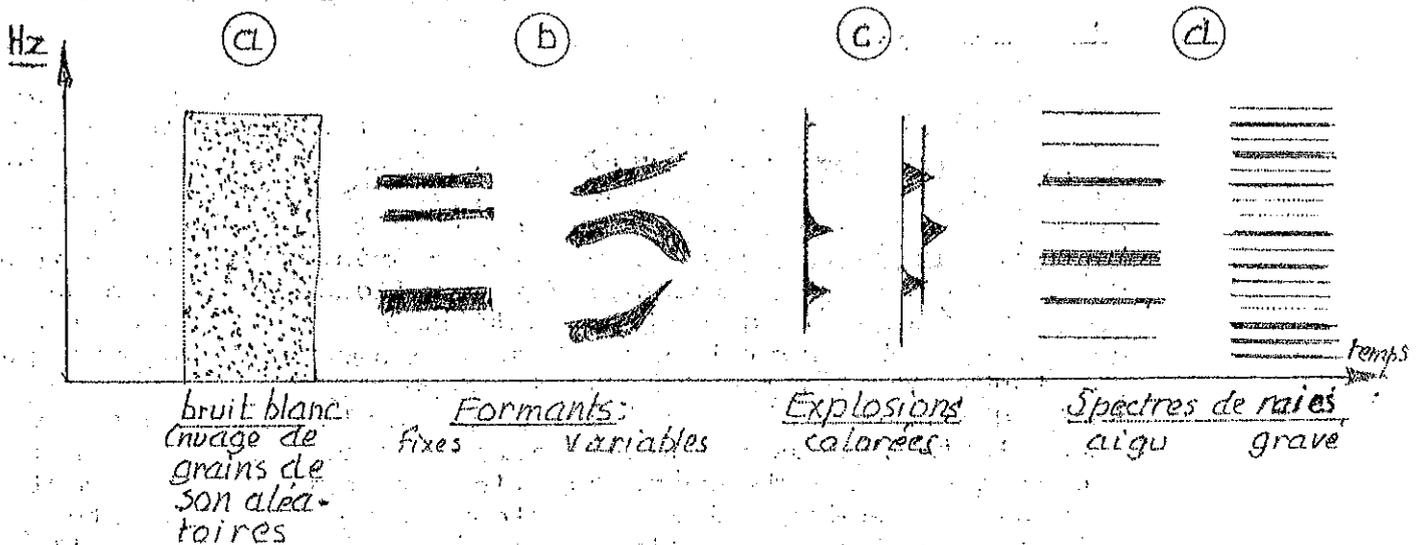


figure 19

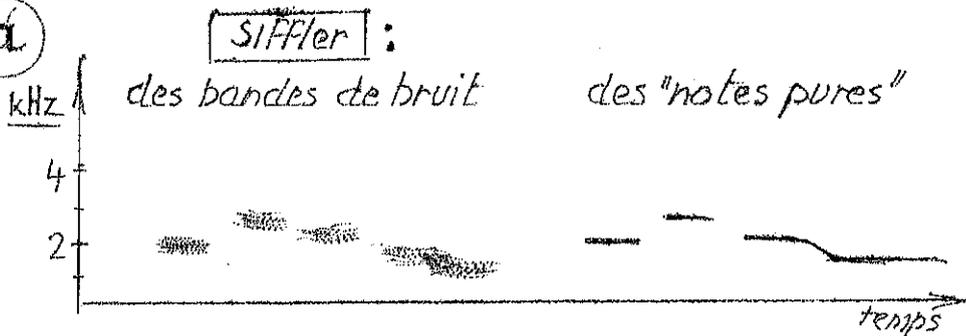
a) des bruits d'écoulement d'air donnent une espèce de " bruit blanc "

b) des bruits de bandes (formants) déterminés par les résonateurs que l'on excite avec un bruit blanc. Ces bandes peuvent bien entendu fluctuer en hauteur moyenne dans la mesure de la déformabilité des résonateurs et de leurs ouvertures.

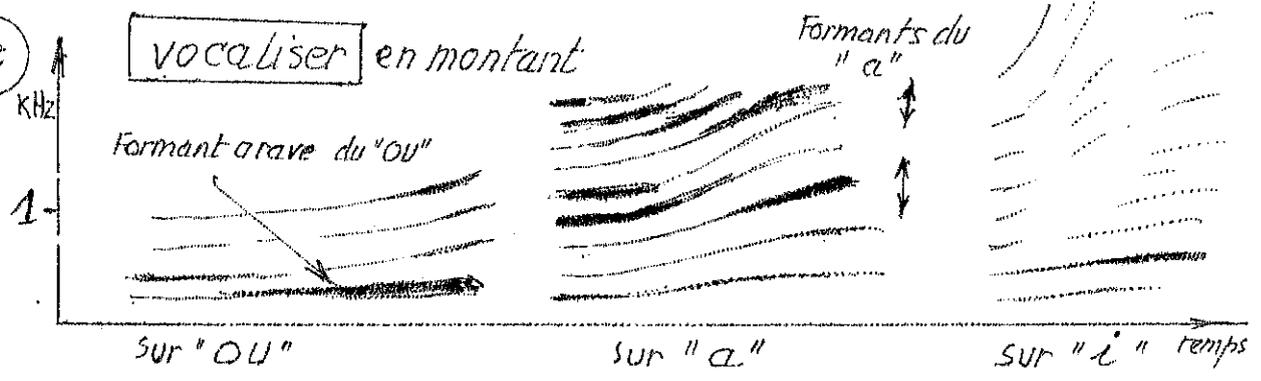
..../

Fig 20

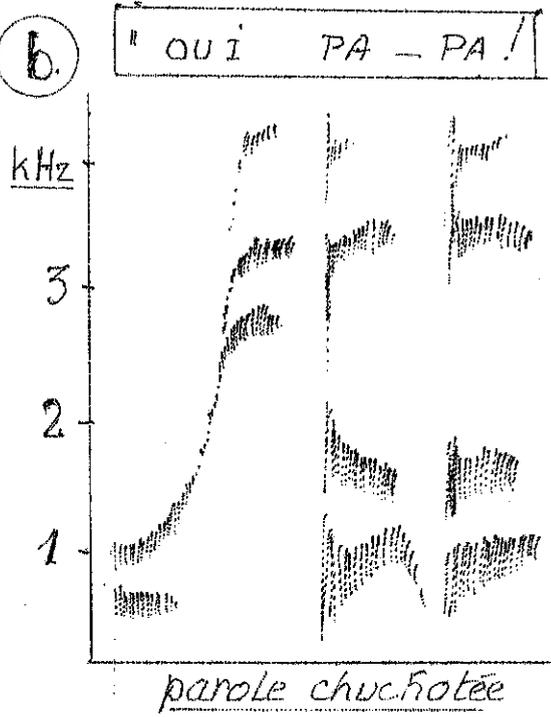
(a)



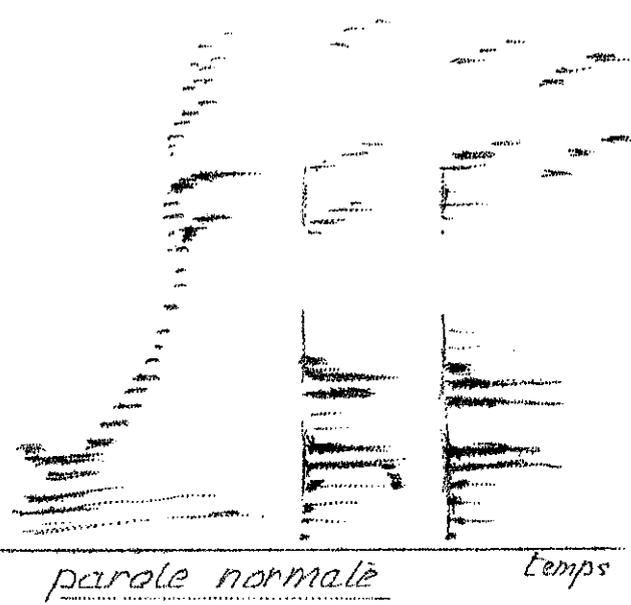
(c)



(b)



(d)



Les formes de la parole chuchotée sont "dessinées" par des bandes de bruit ; elles sont parfaitement reconnaissables parce qu'originales pour chaque mot. La parole normale ne fait que quantifier cette forme qui reste reconnaissable. Le chant n'est que de la parole déformée sur les voyelles selon certaines conventions.

c) de petits impacts, se traduisant par des traits verticaux, plus ou moins colorés s'ils passent dans des cavités.

d) enfin, des spectres de raies fabriqués par les cordes vocales : raies harmoniques écartées pour l'aigu, serrées pour le grave.

2°) LA COMBINATOIRE DES SIGNAUX ELEMENTAIRES (fig. 20)

L'homme a appris de bonne heure à utiliser et combiner ces signaux pour transmettre des messages, sémantiques au début, (signaux de danger, d'avertissement) puis artistiques (gratuits, dans une certaine mesure, comme la musique). Ainsi on peut :

- siffler (20a). On peut diriger un jet d'air sur un bord plus ou moins arrondi : c'est le sifflet " chuchoté ", dont les notes sont constituées de bandes de bruit étroites, mais de hauteur musicale bien définie. Un jet sur une arête (dents) fournit des sons périodiques pauvres en timbre, mais à raies très fines. Le message peut être sémantique ou esthétique : langue sifflée ou musique.

- chuchoter (20b). C'est fabriquer des formes acoustiques reconnaissables à l'aide de bandes de bruit et d'explosions variées, en déconnectant les cordes vocales et en utilisant l'écoulement aérien à travers les cavités dont les mouvements sont programmés convenablement (formants). Nous avons longuement développé ces questions ailleurs (bib.4a et 4b) et montré qu'on peut réaliser un langage totalement intelligible à l'aide d'une simulation électronique (appareil de synthèse : Icophone) où les formes acoustiques sont dessinées simplement sur bande transparente. Le message est uniquement sémantique : la parole chuchotée n'ayant ni hauteur ni intonation.

- vocaliser (20c). C'est faire émettre aux cordes vocales des spectres de raies de hauteur définie, colorés de façon variable par les cavités du système phonatoire. Cela revient à chanter sur " ou ", " a ", " é " etc... Le message est uniquement esthétique. L'appareil phonatoire est alors proprement un instrument de musique, tout à fait comparable au serpent : on peut varier hauteur, intensité et timbre, donc faire de la musique.

On rappelle que le spectre est fonction de deux paramètres absolument autonomes : d'une part, le mouvement des cordes vocales qui détermine la " richesse " en harmoniques (tendance vers la sinusoïde ou le signal en dents de scie) - d'autre part, le système des résonateurs, qui détermine la " couleur " du son entendu en filtrant et amplifiant par résonance des composantes variées.

- parler normalement (20d) . La parole chuchotée ne porte pas à distance. Pour y atteindre, l'homme utilise le spectre de raies délivré par les cordes vocales.

Il s'agit de transmettre une forme reconnaissable, forme nettement mise en évidence par la parole chuchotée. Modulons un spectre de raies par cette forme. Cela revient à disposer un petit résonateur sur chaque raie du spectre. Dans ces conditions, la forme est quantifiée par le spectre de raies d'autant plus finement que la voix est plus grave. Mais la forme reste toujours reconnaissable. Pour peu qu'elle soit liée entre émetteur et récepteur à une signification conventionnellement établie entre eux, le récepteur " comprend " la forme ainsi modulée à une grande distance.

- chanter : C'est simultanément vocaliser et parler, c'est-à-dire associer le maximum d'information esthétique au maximum d'information sémantique; le chant est le " message total ".... Il est évident que les formes sémantiques des mots subissent des déformations plus ou moins marquées, car il faut les plier aux conventions musicales admises : on tient un " o " ou un " è " longtemps pour mettre en évidence l'habileté du chanteur à faire chatoyer le timbre pendant l'émission ! Il va sans dire que le chant est purement conventionnel et valable seulement pour un groupe d'individus qui sont informés à la fois des conventions esthétiques et des conventions sémantiques. Mais il est certain que l'entraînement du chanteur demande généralement des prouesses musculaires de l'appareil vocal qui ne peuvent être atteintes, comme en sport, qu'à la suite d'un long entraînement. La qualité du chant dépend objectivement de la virtuosité, c'est-à-dire de la possession de sous-programmes de mouvements rapides, et de la souplesse nécessaire pour moduler, nuancer, lier les formes acoustiques produites entre elles. On ne peut manquer d'être en admiration devant la mécanique humaine, si on considère le nombre d'organes et de muscles mis en jeu et qu'il convient de coordonner, de façon parfois extrêmement rigoureuse.

A présent nous possédons suffisamment d'éléments pour tirer quelques conclusions :

V - CONCLUSIONS

Nous avons tenté de montrer le fonctionnement et le rendement acoustique de l'appareil phonatoire humain à travers une étude d'acoustique musicale relevant de la lutherie expérimentale, de la physique et de l'acoustique. Tout est très cohérent. Qu'il y ait commande cérébrale volontaire pendant la phonation et le chant, personne n'en doute, la fréquence des impulsions règle simplement la tension de chaque muscle. Pour ceux qui en douteraient, nous pouvons citer des expériences particulièrement démonstratives que nous avons imaginées. Pour la première, on appuie périodiquement sur la pomme d'Adam. Le son baisse et monte de façon incoercible sans que le cerveau n'intervienne (fig.21).... De même en appuyant brusquement sur le bas du dos d'un sujet qui chante une note tenue, le son monte brusquement. Si la fréquence des cordes vocales

...../

Fig 21

On appuie brusquement au bas des poumons :

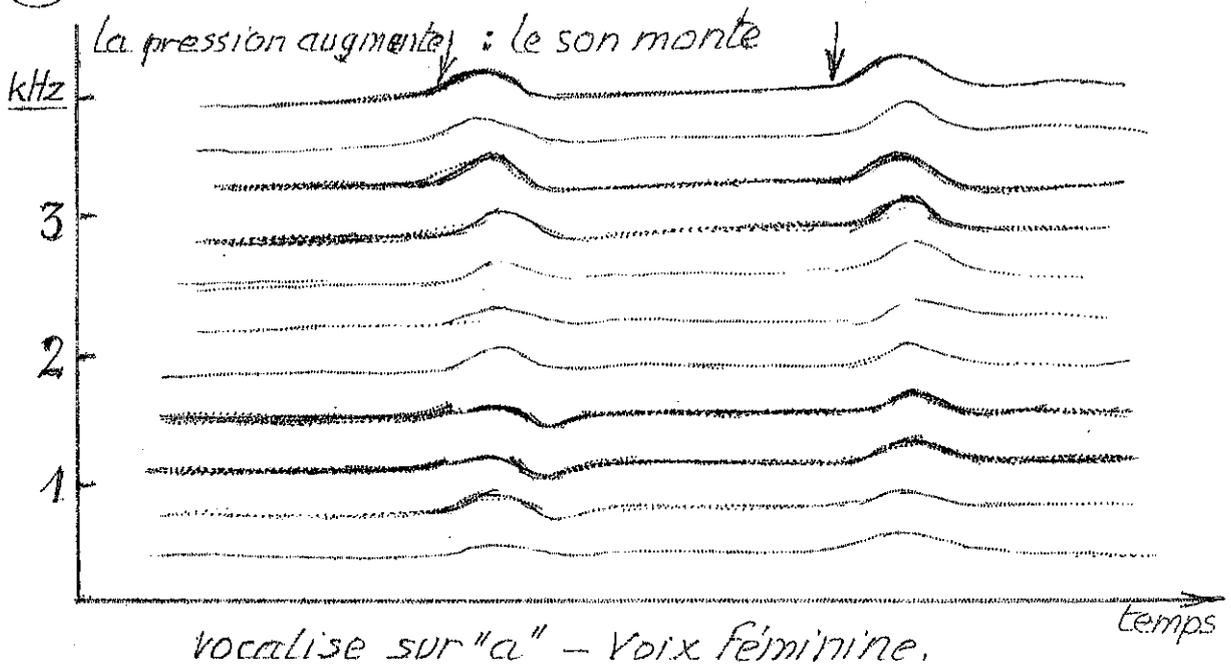
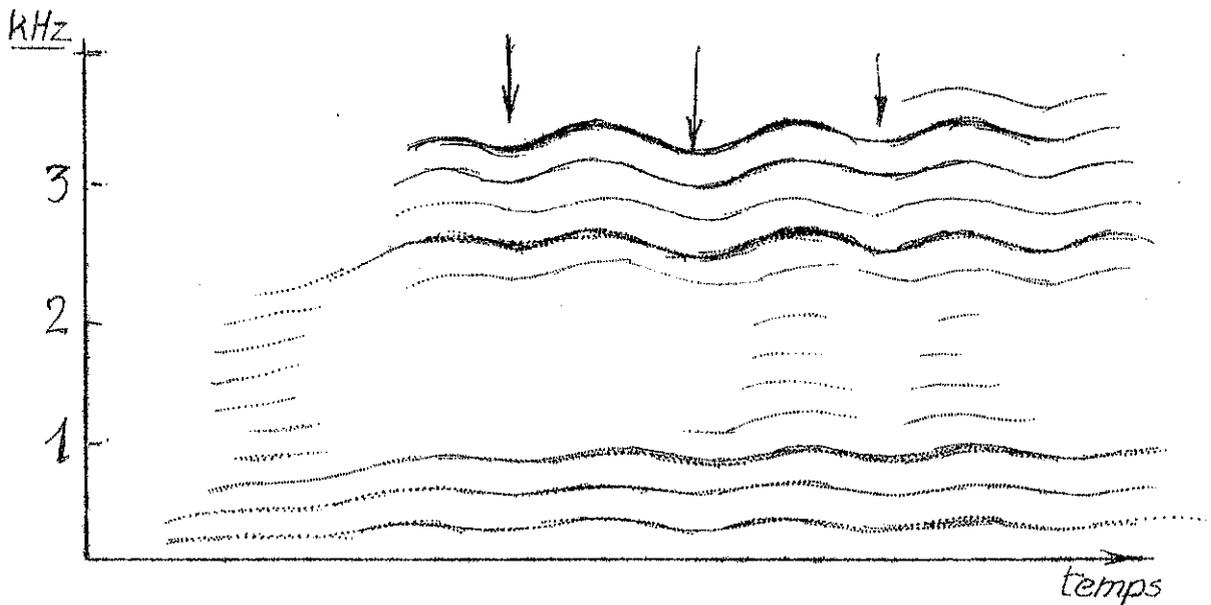


Fig 22

On appuie périodiquement sur la pomme d'Adam.

les cordes vocales se détendent : le son baisse.



Pression d'air et tension des cordes modifient la hauteur :
la régulation de la hauteur n'est pas due à une
commande venant du cerveau. -

était pilotée par un générateur de basse fréquence situé dans les centres supérieurs, et là ne se produirait pas. Il s'agit simplement d'une augmentation brusque et imprévisible de la pression pulmonaire (fig. 22). Tout est donc bien clair; l'appareil phonatoire est un générateur de signaux variables, extrêmement élaboré et dont le fonctionnement, tonus musculaire mis à part, relève exclusivement de la mécanique. Nous avons montré qu'aucune objection sérieuse ne tient; mais il est bien évident que la théorie myoélastique ne peut être valable que pour un larynx vivant, puisque justement la régulation du tonus par le cerveau, où sont stockés les sous-programmes, est en jeu.

Il n'est peut-être pas inutile d'ajouter que la lutherie et l'acoustique musicale, telle que nous l'entendons, peuvent apporter dans tous ces domaines où la génération de signaux est en cause, une contribution que l'on a négligée à tort.

D I S C U S S I O N

Melle DINVILLE . Vous avez parlé du " passage " et Melle CASTELLENGO nous a donné un exemple vocal; mais il était un peu caricatural, car elle ne chantait pas dans sa tessiture; l'effet venait de ce qu'elle raidissait graduellement ses cordes vocales, puis les a relâchées pour passer à un autre régime.

M. LEIPP . Bien sûr. Mais c'est justement ce que nous voulions montrer ! Nous demandons au sujet de partir de la note la plus grave possible et de monter le plus haut possible en continu; on voit alors où se situent les effets dus au manque de coordination musculaire, c'est-à-dire les " passages ". Le fait que, dans les trois exemples donnés, un passage se trouve au même point, montre simplement que le programme de mouvements utilisé par Melle CASTELLENGO est un programme tout à fait automatisé; mais qu'on peut sûrement modifier par rééducation. Il serait important qu'une personne comme vous reprenne le problème du passage avec la méthode que nous préconisons, car en tant que chanteuse professionnelle et orthophoniste, vous êtes une des rares personnes qui sache de quoi elle parle en ce domaine. En tout cas, la méthode du glissando - sonagramme que nous préconisons nous semble intéressante pour classer des voix; on peut d'ailleurs tirer du sonagramme de nombreux renseignements supplémentaires sur le timbre et d'autres particularités de la voix étudiée.

.... /

M. BUSNEL. Vous avez apporté une démonstration et un modèle de fonctionnement du larynx qui me satisfait beaucoup; la transposition de vos idées en biologie pourrait être très fructueuse : nous savons comment sont faits les générateurs de sons de nos animaux, mais nous n'avons sur leur fonctionnement que des idées assez vagues. Je pense en particulier aux générateurs utilisés par les dauphins ou les perroquets qu'il serait intéressant d'étudier avec vos méthodes. En tout cas l'imitation de la parole humaine par le perroquet est parfaite et cependant il n'a pas de cordes vocales.

M. BREMONT. Oui ! Les sonagrammes comparatifs entre une voix humaine et une voix de perroquet sont impossibles à différencier.

M. LEIPP. Les analyses que nous avons faites grâce à Mme BOREL MAISONNY qui possède un perroquet intéressant .. ne nous semblent pas absolument convaincantes de ce point de vue. Auditivement il faut se défier de tirer des conclusions, car si nous connaissons les mots prononcés d'avance - cas des possesseurs de perroquets - nous projetons la forme du mot que nous avons en mémoire sur le signal perçu, et il suffit alors de traces infimes pour que nous reconnaissons les mots; c'est le problème de la suggestion, dont depuis KEMPELEN, ont été et sont encore victimes de nombreux chercheurs en synthèse de parole.. Notre recherche sur la synthèse avec l'icophone nous a beaucoup appris de ce point de vue et nous savons maintenant combien il faut être prudent pour les tests d'intelligibilité.

Un fait reste sans appel : la forme du signal trahit le mécanisme de la source. Les analyses de perroquet que nous avons faites montrent beaucoup plus des allures de voix de laryngectomisé plutôt que de voix normale. Il faudrait voir de près le système phonatoire du perroquet; il n'est absolument pas exclu que cet oiseau utilise plusieurs mécanismes différents : l'un pour siffler, l'autre pour parler; le premier étant un système de flûte, le deuxième un système à impulsions (vanne, par exemple). Mais j'aimerais beaucoup savoir ce que pense Mme BOREL MAISONNY.

Mme BOREL MAISONNY. D'une façon générale, votre façon de poser le problème de la phonation me séduit beaucoup. Vous avez bien fait de parler du rôle de la muqueuse. Je signale d'ailleurs qu'un laryngologiste avait fabriqué un larynx artificiel avec une vulgaire chambre à air de bicyclette, dont il observait la " bouche " au stroboscope; cela marchait très bien.

M. LEIPP. C'est intéressant; mais il simulait ainsi un larynx mort où manquaient des paramètres importants, par exemple le tonus musculaire, ce qui risque d'induire en erreur.

Mme BOREL MAISONNY. Oui, mais cela levait certaines difficultés de l'observation laryngoscopique venant de la position de la langue. J'ai moi-même essayé d'observer les consonnes : c'est un problème difficile !

M. LEIPP. Peut-être les fibres optiques pourraient-elles apporter ici une solution intéressante.

M. BUSNEL. On ne peut pas filmer par manque de lumière

.... /

M. LEIPP. C'est un problème technique : il sera résolu! En tout cas la méthode permettrait de renouveler certains aspects de l'endoscopie.

M. BUSNEL. Le Dr. DJOURNO, de la Faculté de Médecine a mis au point une méthode d'observation par ultra-sons satisfaisante; il se fera un plaisir de vous documenter.

M. SIESTRUNCK. Je pense qu'on doit être rapidement gêné en raison de la mauvaise propagation dans les milieux humides; d'autre part on retombe sur l'inconvénient signalé par M. LEIPP tout à l'heure : on ne peut observer que les grandes amplitudes qui ne sont pas forcément le phénomène important.

M. RENAUDIN. Vous avez dit que le cerveau ne participe pas à la vibration des cordes vocales. Le problème du vibrato est particulièrement intéressant de ce point de vue : il s'agit manifestement d'un phénomène volontaire puisque le chanteur peut le produire ou non à son gré; mais d'autre part il semble que sa fréquence soit involontaire.

M. LEIPP. Je n'ai pas dit que le cerveau ne participait pas à la vibration de cordes vocales; j'ai dit que le nombre d'impulsions ne réglait pas la fréquence du son, mais le tonus des muscles du générateur "instrumental"; la commande vient du cerveau, mais l'effet acoustique est indirect et c'est la position et la raideur du système qui détermine la fréquence de la note. Pour ce qui est de la fréquence du vibrato, c'est un autre problème; le basculement du cartilage thyroïde est certainement soumis à une fréquence critique déterminée par les dispositions anatomiques et mécaniques du système.

M. BUSNEL. Nous cherchons depuis longtemps un ventriloque; la ventriloquie est d'un intérêt considérable pour la compréhension du mécanisme de la phonation.

Mme BOREL MAISONNY. J'ai eu l'occasion d'en étudier un cas à Ste Anne. L'homme n'avait rien d'anormal, mais il s'était entraîné pour gagner de l'argent... Il simulait une scène avec un charbonnier, avec un raseur etc... Mais son manège était accompagné d'une musique; il accentuait ses effets en se courbant subitement etc... ce qui modifiait sa voix, mais empêchait de faire des observations sur l'écran radioscopique... Nous avons cependant observé qu'il immobilisait son diaphragme, raidissait sa langue, entre-ouvrait faiblement ses lèvres qui remuaient imperceptiblement. Tout cela aboutissait à modifier le spectre de la voix : déplacement des formants par rapport à la voix normale, altération systématique des formes temporelles etc...

M. BUSNEL. Utilisait-il les cordes vocales ?

Mme BOREL MAISONNY. Je ne pouvais le voir, mais il avait de la voix :

M. LEIPP. Un sonagramme vous aurait renseigné immédiatement. S'il y a un spectre de raies sur les voyelles, c'est que les cordes marchent : je suis formel là dessus. Mais il n'est pas exclu qu'on puisse utiliser des suppléances; par exemple remplacer les cordes vocales par les bandes ventriculaires. Je crois que les voix ventriculaires sont connues; on a, dans ces conditions, un spectre de raies de caractéristiques différentes de celui des cordes vocales.

...../

Mme HELFFER. Sait-on comment procèdent certains chanteurs tibétains qui chantent à deux voix ?

M. LEIPP. Une étude est parue récemment dans le Journal of Acoustical Society of America (J.A.S.A. Vol. 41 n°5, 1er Février 1967). L'explication de ces auteurs reste hypothétique. Ils pensent que les chanteurs accordent les deux premiers formants de la voix sur 375 et 750 Hz, le spectre de la voix (spectre de raies selon ce qu'on a vu plus haut) étant accordé à 75 Hz. Dans ces conditions on entend deux ou trois hauteurs : l'une déterminée par le réseau d'harmoniques des cordes vocales (75 Hz soit environ ré₁), l'autre déterminée par les formants excités par le spectre de raies parce qu'ils sont réglés sur l'harmonique 5 et 10 respectivement; d'où une "note" supplémentaire (fa dièse 3, 375 Hz) et une autre à l'octave (fa dièse 4, 750 Hz). La difficulté pour le chanteur étant de régler avec assez de précision un spectre grave de cordes vocales et, simultanément, deux cavités déterminant les deux formants. C'est un cas intéressant que nous aimerions bien étudier car les conclusions des auteurs précités ne sont pas très nettes.

On sait aussi d'autre part qu'il existe certains cas de disphonies ou un individu "chante à deux voix". On peut imaginer par exemple des cordes vocales vibrant simultanément sur deux régimes, ou se touchant périodiquement en un certain point lors de la vibration etc.. Peut-être pourrait-on s'entraîner à régler systématiquement ce phénomène....

M. SIESTRUNCK. L'approche objective de la phonation par le biais de la lutherie et de la mécanique ne semble d'un intérêt évident. Cette réunion aura eu le mérite de montrer que la simulation d'un phénomène compliqué à l'aide d'un modèle simple, mais comportant les fonctions essentielles est toujours très efficace pour comprendre les mécanismes difficilement accessibles en direct, comme c'est souvent le cas en anatomie-physiologie humaine. Je pense que tout le monde en sera convaincu à présent.

BIBLIOGRAPHIE

- 1°) LAFON (J.C.) et CORNUT (G) - Phonation et fonctionnement
impulsionnel du larynx
Ann. Telec. Tome 17, n°5-6 (1962) p. 107-116.
- 2°) BOUASSE (H) - Tuyaux et résonateurs.
Delagrave Paris 1929

Instruments à vent.
Delagrave Paris 1929 (2 tomes)
- 3°) MARTIN (D.W.) - Lip vibrations in a cornet mouthpiece
J.A.S.A. Vol 13, n° 3 (1942) p. 305-308.
- 4a) LEIPP (E) - Information sémantique et parole.
Essai d'une Gestaltheorie.
Bulletin GAM n° 22. Paris Juin 1966.
- 4b) LEIPP (E), CATELLENGO (M), LIENARD (J.S.), SAPALY (J)
Structure physique et contenu sémantique de la parole
Colloque GALF. Grenoble, Avril 1967. A paraître dans
la Revue d'Acoustique du GALF.
- 5°) ROUVIERE (H) - Anatomie humaine descriptive et topographique
Masson. Paris 1961.
- 6°) GREGOIRE (R) et OBERLIN. - Précis d'Anatomie
J.B. Baillière et fils PARIS 1964.