



M. CASTELLENGO  
LA FLÛTE  
TRAVERSIÈRE

AVEC LA COLLABORATION DE  
GENEVIÈVE NOUFFLARD  
ET MARTIAL LEFÈVRE

AVRIL 1968

N°35

GAM

BULLETIN DU GROUPE D'ACOUSTIQUE MUSICALE  
FACULTÉ DES SCIENCES - 8 RUE CUVIER, PARIS 5'

G.A.M.  
Groupe d'Acoustique Musicale  
Laboratoire d'Acoustique  
Faculté des Sciences  
8, Rue Cuvier

PARIS, le 4 Juin 1968

Adresse Postale :  
9, Quai Saint Bernard  
Paris

BULLETIN N° 35

LA FLUTE TRAVERSIERE

I - REUNION DU 1er AVRIL 1968

Etaient présents :

Monsieur le Vice-Doyen GAUTHIER qui nous a honoré de sa présence.

Monsieur SIESTRUNCK, Président  
Monsieur LEIPP, Secrétaire Général  
Mademoiselle CASTELLENGO, Secrétaire.

Puis par ordre d'arrivée :

J.S. LIENARD, (Ingénieur A. et M.); M. HERICHE (flûtiste, orch. de l'Opéra); M. LIBON, (Electricien); Mlle LEIPP (Etudiante orthophonie); Mlle NOUFFLARD (Flûtiste); Mlle WALCH; M. DORGEUILLE (Dr. en Médecine); M. FRANCOIS (Lab. Acoustique E.D.F.); M. CARCHEREUX (Maître Luthier); Mlle MEGEVAND (O.R.T.F.); M. RENAUDIN (Classe de Musicologie Poitiers); Mme NYEKI (Phonothèque Nationale); M. GENET-VARCIN (Chef T.P. Chimie); M. R. LE ROY (Prof. au Conservatoire); M. BILLARD (Etud. Archit); M. EHRMANN (Prés. Confédération Musicale de France); M. DEJEAN (Compositeur); M. OUNA (Rédacteur à " Das Musikinstrument "); M. CONDA-MINES (Lab. Acoust. ORTF); Mme BOREL-MAISONNY (Orthophoniste); M. SAIEB (Etud. Musicol.); Mme de CHAMBURE (Conservateur Musée Instrum. Conservatoire); Mme LEIPP; Mme CHARNASSE (C.N.R.S.); M. TAMBA (C.N.R.S.); M. CUILLERIER (Etud. IDHEC); M. TRAN VAN KHE (Maître Rech. C.N.R.S.); Y. ETTLINGER (Clarinettiste, Opéra Tel Aviv); M. CUVELIER (Etud.); Mme LECOSSOIS (Institut. Cathol.); Mme STRAUS (Prof. Lycée La Fontaine); M. LEFEVRE (Flûtes BUF-FET-CRAMPON); M. BLONDEAU (Etud. Musique); Mlle KREBS (Fac. Sciences); M. CLEAVER (Tambourinaire); M. DUPARCQ (Co-Directeur Revue Musicale); M. MATTEI (Dir. Labo Acoust. E.D.F.) M. DETTON (Cybernétique Musicale).

Excusés :

M. CANAC (Directeur Honoraire C.R.P. Marseille); M. J. CHAILLEY (Directeur Institut de Musicologie); M. LANDOWSKI (Inspecteur Général de la Musique);

Mme M.J. CHAUVIN  
Milles LEVALLOIS, S. HUE.

MM. CASAL, CHENAUD, NANARD, JAMET, G. FAVRE, Dr. VALLANCIEN, Dr POUBLAN, Dr CIAVIE, FRIEDERICH, TOURTE, PUJOLLE, BLONDELET, GEORGEAIS, BEAUGNIER, J. BERNARD, CHARPEINE, MAILLOT, GILOTAUX, ST-GUIRONS, GRINDEL, GUEN, H. MOECK (Allemagne), FORET, BENEDETTI, MOLES,

	<u>Pages</u>
I - <u>INTRODUCTION</u> .....	1
II - <u>GENERALITES SUR LES TUYAUX A EMBOUCHURE DE FLUTE</u>	1
A - <u>PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT</u> .....	1
1) <u>Le tuyau</u> .....	1
a) Fréquence propre d'un tuyau cylindrique.....	1
b) Ondes stationnaires et partiels du tuyau.....	2
2) <u>Le système lame d'air-biseau</u> .....	4
3) <u>Association d'un système lame d'air-             biseau et d'un tuyau</u> .....	4
4) <u>Expériences de visualisation</u> .....	5
a) Zéphirin Carrière .....	5
b) ISING .....	6
B - <u>LES TUYAUX A EMBOUCHURE DE FLUTE DANS         LA REALITE</u> .....	7
1) <u>Variations de la fréquence fondamentale</u>	7
a) Calcul de la fréquence fondamentale Corrections.....	7
b) Variation de la fréquence avec le débit.....	8
c) Variation de la fréquence avec les dimensions de la bouche .....	8
2) <u>La justesse des partiels</u> .....	8
a) Rôle de la taille.....	8
b) Rôle des discontinuités du diamètre du tuyau.....	9
c) Place du bouchon dans la flûte traversière .....	9
C - <u>LE PROBLEME DES TROUS LATERAUX</u> .....	11
1) <u>Place, diamètre des trous et justesse             des partiels</u> .....	11
2) <u>Cas des flûtes n'utilisant que le par-             tiel 1 (pipeau)</u> .....	13
3) <u>Cas des flûtes utilisant les partiels             2 et 3</u> .....	13

	<u>PLAN (Suite)</u>	<u>Pages</u>
D -	<u>CAS DES TUYAUX CONIQUES</u> .....	13
E -	<u>DIFFERENTS TYPES DE FLUTES</u> .....	15
III -	<u>LA FLUTE TRAVERSIERE</u> .....	16
A-	<u>HISTORIQUE</u> .....	16
1)	<u>Jusqu'à BOEHM</u> .....	16
2)	<u>Perfectionnements apportés par BOEHM.</u> ..	18
a)	La perce .....	19
b)	La place du bouchon .....	20
c)	Les trous .....	21
d)	La mécanique .....	21
B -	<u>INTERET MUSICAL DE LA FLUTE TRAVERSIERE.</u> ..	22
1)	<u>Champ de liberté des durées</u> .....	22
2)	<u>Champ de liberté des intensités</u> .....	22
3)	<u>Champ de liberté des hauteurs.</u> .....	23
4)	<u>Champ de liberté des timbres</u> .....	24
a)	Le timbre de la flûte .....	25
b)	Variations de timbre dépendant de l'instrument.....	26
c)	Variations de timbre dépendant du flûtiste .....	27
C -	<u>LA FLUTE ALTO ET LE PICCOLO</u> .....	29
IV -	<u>CONCLUSIONS</u> .....	31
V -	<u>ENTRETIEN AVEC M. LEFEVRE ET DISCUSSION</u> .....	33

# LA FLUTE TRAVERSIERE

## I - INTRODUCTION

La flûte traversière fait partie d'un groupe d'instruments appelés très généralement " instruments à embouchure de flûte ". On classe dans ce groupe tous les instruments avec lesquels on produit un son en soufflant de façon appropriée sur l'arête d'une ouverture pratiquée à un point quelconque d'un tuyau.

L'étude théorique et physique des phénomènes qui se produisent dans les tuyaux à embouchure de flûte est très compliquée. Cependant il nous a semblé intéressant d'en donner un aperçu schématique afin de mieux comprendre ensuite les raisons de l'évolution historique de la flûte traversière et l'intérêt de cet instrument sur le plan musical.

## II - GENERALITES SUR LES TUYAUX A EMBOUCHURE DE FLUTE.

### A - PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

#### 1 - Le tuyau

##### a) Fréquence propre d'un tuyau cylindrique.

Prenons un tuyau cylindrique de longueur  $L$  ouvert aux deux bouts. En l'excitant de façon quelconque, par exemple en tapant sur une de ses extrémités, on entend un son de durée très brève mais de hauteur bien définie. On a donc mis en route un phénomène quasi périodique que l'on peut expliquer schématiquement de la façon suivante.



fig. 1

On produit en A une compression d'une mince tranche d'air. Cette compression va se transmettre à la couche d'air voisine et ainsi de suite jusqu'à l'extrémité du tuyau, sans déplacement de matière, donnant ainsi naissance à une onde progressive.

.... /

En B la compression se réfléchit sur l'extrémité ouverte du tuyau et repart, toujours à l'intérieur du tuyau, sous forme de dépression.

En A, deuxième réflexion, une nouvelle compression se propage de A à B et le phénomène se reproduit identique à lui-même. On a donc accompli un cycle dont on peut calculer la période :  $T = 2L/V$ , où L est la longueur du tuyau et V la vitesse de propagation du son dans l'air à une température donnée. La fréquence du phénomène (nombre de Hertz ou de cycles accomplis en une seconde) est  $N = V/2L$ . Elle détermine la hauteur du son perçu.

Dans un tuyau fermé à un bout, l'onde progressive à l'intérieur du tuyau se réfléchit sans changer de signe (une compression repart sous forme de compression). Il faut donc parcourir 4 fois le tuyau avant que le phénomène ne se reproduise identique à lui-même. On a dans ces conditions  $T = 4L/V$  et  $N = V/4L$ . Ceci donne un son de fréquence moitié, donc à l'octave inférieure du précédent.

En théorie, l'onde progressive ainsi provoquée ne sort pas du tuyau puisqu'à chaque extrémité elle se réfléchit et revient sur elle-même; le mouvement doit se reproduire indéfiniment, mais on ne devrait rien entendre à l'extérieur.

En fait on entend un son. Or les parois sont rigides dans la plupart des cas et ne peuvent donc rayonner d'énergie. On admet donc qu'il existe à chaque extrémité une onde progressive transportant l'énergie jusqu'à notre oreille. Cette dépense d'énergie, ainsi que les frottements contre les parois expliquent l'amortissement très rapide de l'onde progressive se propageant à l'intérieur du tuyau. Le son ne dure jamais plus de quelques dixièmes de seconde.

b) Ondes stationnaires - Les partiels du tuyau

Jusqu'à maintenant nous avons considéré uniquement le cas d'une impulsion isolée. Dans la réalité on excite toujours un tuyau par une suite d'impulsions, chacune donnant naissance à une onde progressive à l'intérieur du tuyau. Il se produit alors des interférences entre les ondes partant de A à B et les ondes réfléchies revenant de B à A, et au bout d'un temps très court le tuyau est le siège d'un système d'ondes stationnaires. En certains points l'amplitude des déplacements est maximum, ce sont des ventres de vitesse (v), en d'autres points l'amplitude des déplacements est nulle, ce sont des noeuds de vitesse (n).

- Si la fréquence d'excitation est synchronisée sur la fréquence propre du tuyau, c'est le régime fondamental. La répartition des noeuds et des ventres de vitesse est donnée dans la figure ci-dessous.

...../

Régime fondamental ou partiel 1



$$N = \frac{v}{2L}$$

$$N = \frac{v}{4L}$$

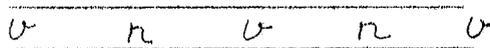
v : ventre de vitesse.

n : noeud de vitesse.

- Augmentons la fréquence de la source excitatrice. L'onde stationnaire existe toujours mais son amplitude diminue. Lorsque la fréquence d'excitation est synchronisée sur le double de la fréquence propre du tuyau : tout se passe comme si le tuyau ouvert aux deux bouts se transformait en deux tuyaux de demi-longueur : c'est le régime 2. Il vibre à l'octave du son fondamental.

Théoriquement le tuyau fermé à un bout vibre toujours en régime fondamental

Régime 2 , partiel 2



$$N = 2 \left( \frac{v}{2L} \right)$$

- Quand la fréquence d'excitation est synchronisée sur le triple de la fréquence propre du tuyau, on obtient les répartitions suivantes :

Régime 3 , partiel 3



$$N = 3 \left( \frac{v}{2L} \right)$$

$$N = 3 \left( \frac{v}{4L} \right)$$

Chacun des tuyaux vibre comme un tuyau dont la longueur serait le tiers. Ainsi de suite.

En résumé, un tuyau donné peut vibrer suivant divers modes, selon la fréquence d'excitation.

Les fréquences de partiels d'un tuyau ouvert aux deux bouts sont les multiples entiers du fondamental, ils sont donc comme la suite des harmoniques.

...../

Les fréquences des partiels d'un tuyau fermé à un bout sont les multiples entiers impairs du fondamental. Ils sont donc comme la suite des harmoniques pairs.

## 2 - Le système lame d'air-biseau

De l'air comprimé sort par un ajutage aplati et est dirigé sur un obstacle en forme de coin ou de biseau. Appelons " lumière " l'orifice de sortie de l'ajutage. Pour une position convenable du biseau par rapport à la lumière et pour une pression basse (quelques millimètres d'eau), on entend un son de faible intensité. Augmentons la pression, la fréquence de ce son croît très rapidement, devient un sifflement très aigu, puis un bruissement.

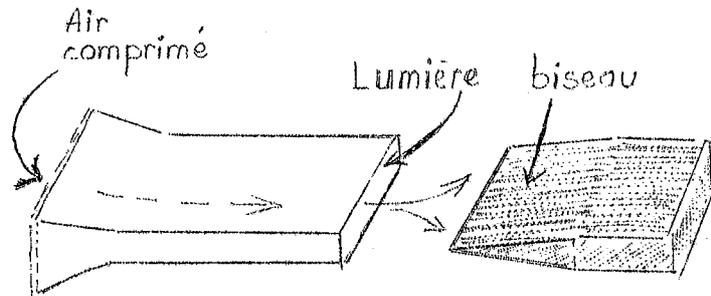


Figure 3

On vérifie que la fréquence de ce son dépend de la vitesse de l'air à la sortie de la lumière (liée à la pression et à la section de la lumière) et de la distance lumière-biseau. (Bib.1, Tome II, chap.IX).

Un tel système est donc capable de produire des variations périodiques de pression. Son fonctionnement est passablement compliqué. On sait que l'air passe alternativement d'un côté et de l'autre du biseau; il se produit des enroulements dus à la rencontre de l'air en mouvement et de l'air environnant, aux frottements sur le biseau, etc... L'allure des phénomènes est très différente selon que la vitesse de l'air est faible ou très grande; beaucoup plus d'études ont été faites dans le deuxième cas.

Pour la suite de l'exposé, retenons que, pour une pression donnée, l'intensité et la stabilité du son de biseau dépendent :

- de la forme du jet d'air à la sortie de l'ajutage,
- de l'orientation du jet par rapport au biseau,
- de l'état de surface de l'arête du biseau.

Lorsqu'on associe un système lame-d'air-biseau à un tuyau on obtient une flûte.

## 3 - Association d'un système lame d'air-biseau et d'un tuyau.

On a affaire à un système nouveau dans lequel chacun des éléments ne fonctionne plus comme précédemment car il se pro-  
...../

duit des couplages entre eux. Deux cas sont à considérer, (Bib.2 p. 113).

Régime buccal : Le système lame d'air-biseau fournit un son dont la fréquence croît rapidement avec la pression. Chaque fois qu'elle sera égale à la fréquence de l'un des partiels du tuyau, elle sera renforcée notablement. On entend donc pratiquement une suite de sons faibles, instables, comme la suite des harmoniques pairs ou impairs selon que le tuyau est ouvert ou fermé à l'extrémité opposée. La fréquence est déterminée par le système lame d'air-biseau, le tuyau réagit comme un résonateur.

Régime normal : Pour des pressions plus élevées que dans le cas précédent le fonctionnement est différent, c'est celui que l'on rencontre dans les flûtes. Au départ, le système lame d'air-biseau joue le rôle d'excitateur; en donnant la première impulsion, il lance l'onde stationnaire.

L'onde stationnaire réagit sur le système excitateur et lui impose sa fréquence. Une partie du jet d'air rentre dans le tuyau et contribue à l'entretien de l'onde stationnaire. L'autre partie rayonne, à partir du biseau, une onde progressive qui transporte jusqu'à notre oreille une part importante du son perçu. Dans certains cas, le son de biseau coexiste et l'on entend simultanément avec le son fondamental dû à l'onde stationnaire, un sifflement aigu que l'on peut mettre en évidence par des analyses.

Les données que nous venons d'exposer sont tout à fait schématiques et ne rendent compte que de l'allure des phénomènes. On trouvera dans les manuels classiques d'acoustique les développements souhaités.

Pour progresser dans la compréhension des mouvements de l'air au niveau du biseau, de nombreux chercheurs ont tenté depuis quelques années, de rendre visible les phénomènes.

#### 4 - Expérience de visualisation

##### a) Zéphirin CARRIERE

En 1924 l'abbé Z. CARRIERE (Bib.3) expérimente sur un tuyau d'orgue à bouche rectangulaire de grandes dimensions, bouché à une extrémité (bourdon), longueur 15 m; largeur et profondeur : 55 x 62 cm.

La hauteur de la bouche, la largeur de la lumière, l'orientation du jet d'air sont réglables dans de grandes marges. A la pression de 140 mm d'eau et pour certaines dimensions de la bouche et de la lumière, le tuyau donne le partiel 9; on a 43,3 Hz (Fréquence fondamentale du tuyau, env. 5 Hz).

...../

Le tuyau est muni de fenêtres de verre dans ses parois afin de permettre l'observation. Par un petit conduit débouchant dans le jet d'air, juste au-dessous de la lumière, on envoie de la vapeur d'eau sous pression. A la sortie de la lumière, celle-ci se condense sous forme de fines gouttelettes en suspension (nuage) qui, sous un éclairage approprié sont suffisamment opaques pour rendre bien visible le jet d'air. A l'aide d'un dispositif d'observation stroboscopique synchronisé sur la fréquence du tuyau, Z. CARRIERE observe les phénomènes qui paraissent immobiles et il a tout le temps nécessaire pour dessiner avec précision ce qu'il voit.

La figure 4 ci-contre reproduit les dessins de Z. CARRIERE faits à l'aérographe, montrant l'état des phénomènes à six moments différents de la période.

On voit que l'air sort de la lumière sous la forme d'un jet très mince qui s'épaissit peu à peu, pour donner naissance, au niveau du biseau, à un enroulement dans lequel l'air extérieur est entraîné, sans se mélanger. Selon que le jet d'air passe à droite ou à gauche du biseau, des enroulements vont se propager vers l'intérieur ou vers l'extérieur du tuyau. Ils se translatent verticalement avec une vitesse plus faible que la vitesse de sortie de l'air. On notera que les enroulements sont plus stables à l'extérieur du tuyau.

Pendant une période, le jet d'air est passé une fois de part et d'autre du biseau et a donné naissance à deux enroulements, un à l'intérieur et un à l'extérieur du tuyau. L'oscillation du jet d'air est entretenue par l'onde stationnaire existant à l'intérieur du tuyau.

La méthode de visualisation de l'abbé CARRIERE, remarquable pour l'époque, présente l'inconvénient d'utiliser un tuyau de très grandes dimensions, qu'on ne trouve pas en musique. D'autre part les dessins ne donnent que l'aspect statistique des phénomènes à certains moments du cycle. La technique moderne permet de filmer en continu le déroulement d'une séquence réelle afin de l'observer au ralenti.

#### b) ISING

En 1965 H. ISING procède de la façon suivante. ("Uber die Tonbildung in Orgelpfeifen." Cpt. Rend. 5<sup>o</sup> ICA - Liège 1965)

Il utilise un tuyau d'orgue à bouche de section carrée et bouché. Longueur 320 mm; côté 32 mm, dont la fréquence fondamentale est environ 220 Hz.

ISING alimente le tuyau avec de l'acétylène; ce gaz n'a pas le même indice de réfraction que l'air bien que la célérité du son y soit la même. Par un éclairage approprié en lumière polarisée il est donc possible de filmer les phénomènes à 3000 images par seconde, ce qui donne à la projection un ralentissement d'environ 200 fois.

fig4

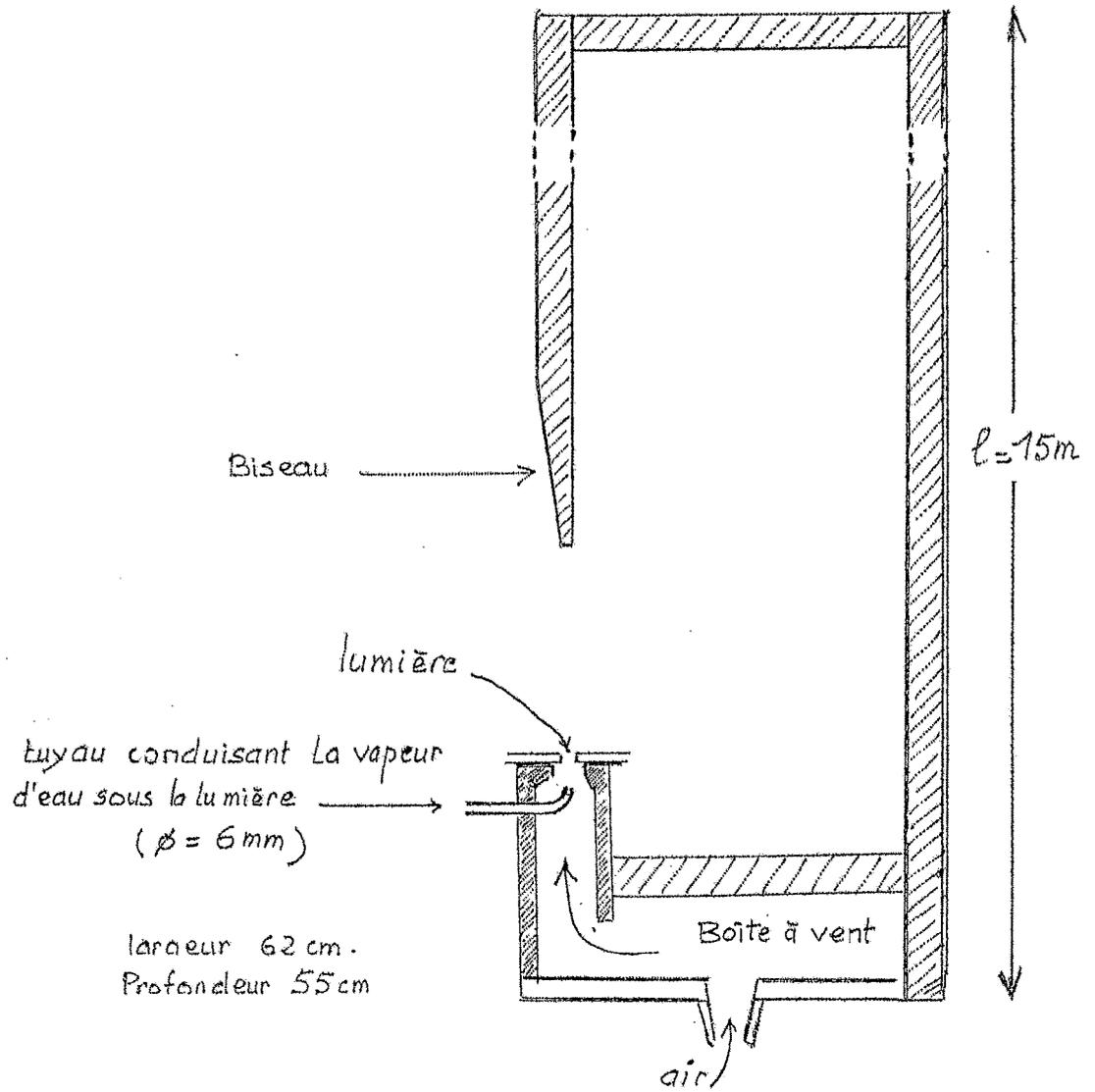
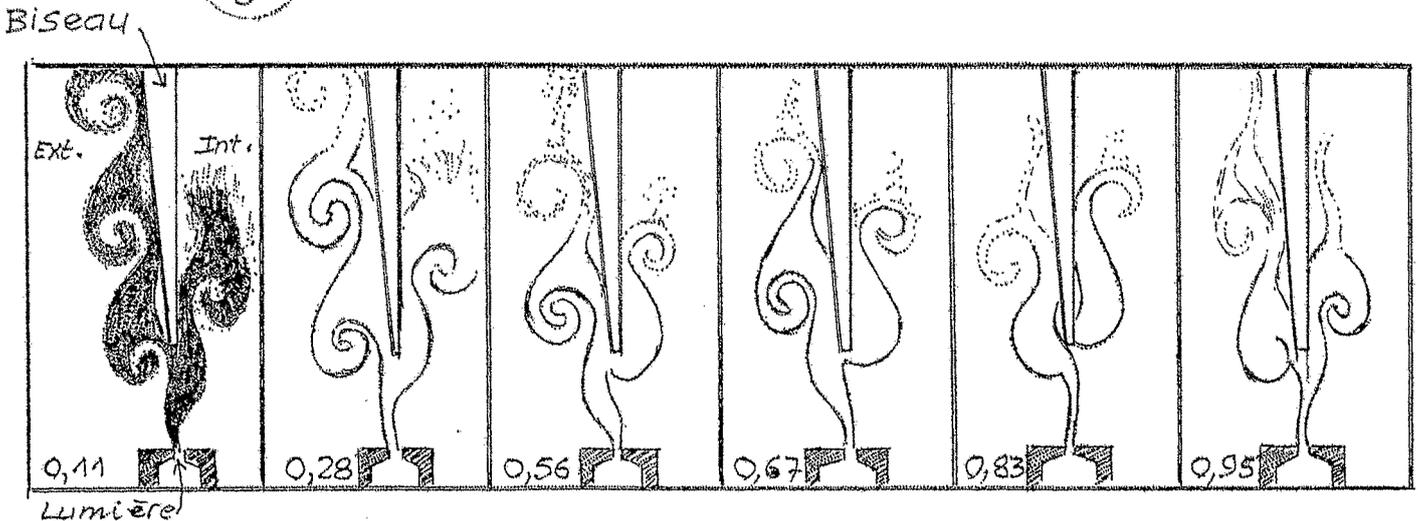


fig5



VISUALISATION DES PHÉNOMÈNES AÉRIENS A L'EMBOUCHURE D'UN TUYAU D'ORGUE (Z. CARRIERE)

le tuyau donne le partiel 9 (fréq. 43,3 Hz)

les chiffres indiquent les fractions de période auxquelles correspondent les observations  
(Reproduction schématisées des dessins de Z. CARRIERE A "l'aérographe")

La projection du film au cours de la séance du G.A.M. nous a permis d'observer l'oscillation de la lame d'air dont la partie la plus importante sortait du tuyau. On a pu remarquer aussi que le mouvement d'oscillation n'était pas régulier et se rapprochait plus d'une oscillation carrée que d'une oscillation sinusoïdale. Pour de grandes vitesses, une partie de l'acétylène entrée dans le tuyau était refoulée vers le fond (nommé biseau par les organiers) créant des tourbillons à cet endroit. Ce phénomène est certainement lié au rôle de la place du bouchon dans la flûte traversière.

Nous espérons faire prochainement au laboratoire des expériences de visualisation. Il manque dans ces deux travaux l'enregistrement sonore concomitant qui permettrait d'établir des relations entre l'allure des mouvements aériens au niveau de la bouche et le spectre acoustique du tuyau.

En fait les mouvements de l'air au niveau de la bouche sont beaucoup plus compliqués qu'on ne pourrait le croire, en étudiant les magnifiques enroulements mis en évidence par Z. CARRIERE... De telles observations ont le mérite de donner une idée générale de l'allure des choses, mais il convient de faire à ce sujet quelques remarques. On ne peut observer que dans un plan, et partant on néglige toujours la troisième dimension. D'autre part, on altère tant soit peu le phénomène réel en introduisant des corps étrangers, en disposant des conduits dans la lumière etc... Mais surtout il faut prendre garde à ne pas oublier qu'on ne peut visualiser qu'une partie des phénomènes; l'important est peut-être ce que l'on ne voit pas ... Autour de 3000 Hz, l'oreille est sensible à de très petites amplitudes : de l'ordre de l'atome d'une molécule d'hydrogène, ce qui limite l'intérêt des observations visuelles.

## B - LES TUYAUX A EMBOUCHURE DE FLUTE DANS LA REALITE

### 1 - Variations de la fréquence

#### a) Calcul de la fréquence fondamentale.

La formule de Bernoulli :  $N = V/2L$  pour les tuyaux ouverts aux deux bouts et  $N = V/4L$  pour les tuyaux fermés à un bout suppose des conditions aux extrémités qui ne sont jamais remplies. En particulier, l'extrémité du tuyau du côté de la bouche n'est ni ouverte, ni fermée mais partiellement ouverte seulement. Il s'ensuit que la fréquence calculée ne correspond pas à la fréquence propre du tuyau et qu'il faut introduire des corrections pour lesquelles nous renvoyons aux ouvrages d'acoustiques. (Bib. 1 p. et Bib.4). Dans la pratique la fréquence réelle est toujours plus basse que la fréquence calculée.

b) Variations de la fréquence avec le débit.

La fréquence fondamentale du tuyau, déterminée par l'onde stationnaire en régime normal n'est pas fixe mais croît avec le débit de l'air sortant de la lumière. Il en est de même pour les partiels. Ce phénomène mal connu est capital pour le musicien puisqu'il permet de faire des fluctuations de hauteur (vibrato, attractions, correction de notes trop hautes ou trop basses) en agissant soit sur la pression soit sur la section de la lumière.

La figure 5 montre les courbes de variations de la fréquence en fonction de la pression pour un tuyau à bouche.

c) Variation de la fréquence avec les dimensions de la bouche.

Toutes choses égales par ailleurs, la fréquence est proportionnelle à la surface découverte à la bouche. On comprend aisément que plus cette surface est grande, plus on se rapproche de la condition idéale d'une extrémité ouverte. La figure 6 donne un exemple de cette variation dans le cas d'un pipeau.

Dans le cas de la flûte traversière, cette possibilité est largement exploitée par le musicien qui recouvre plus ou moins le trou d'embouchure en cours de jeu, comme nous le verrons par la suite.

2 - La justesse des partiels.

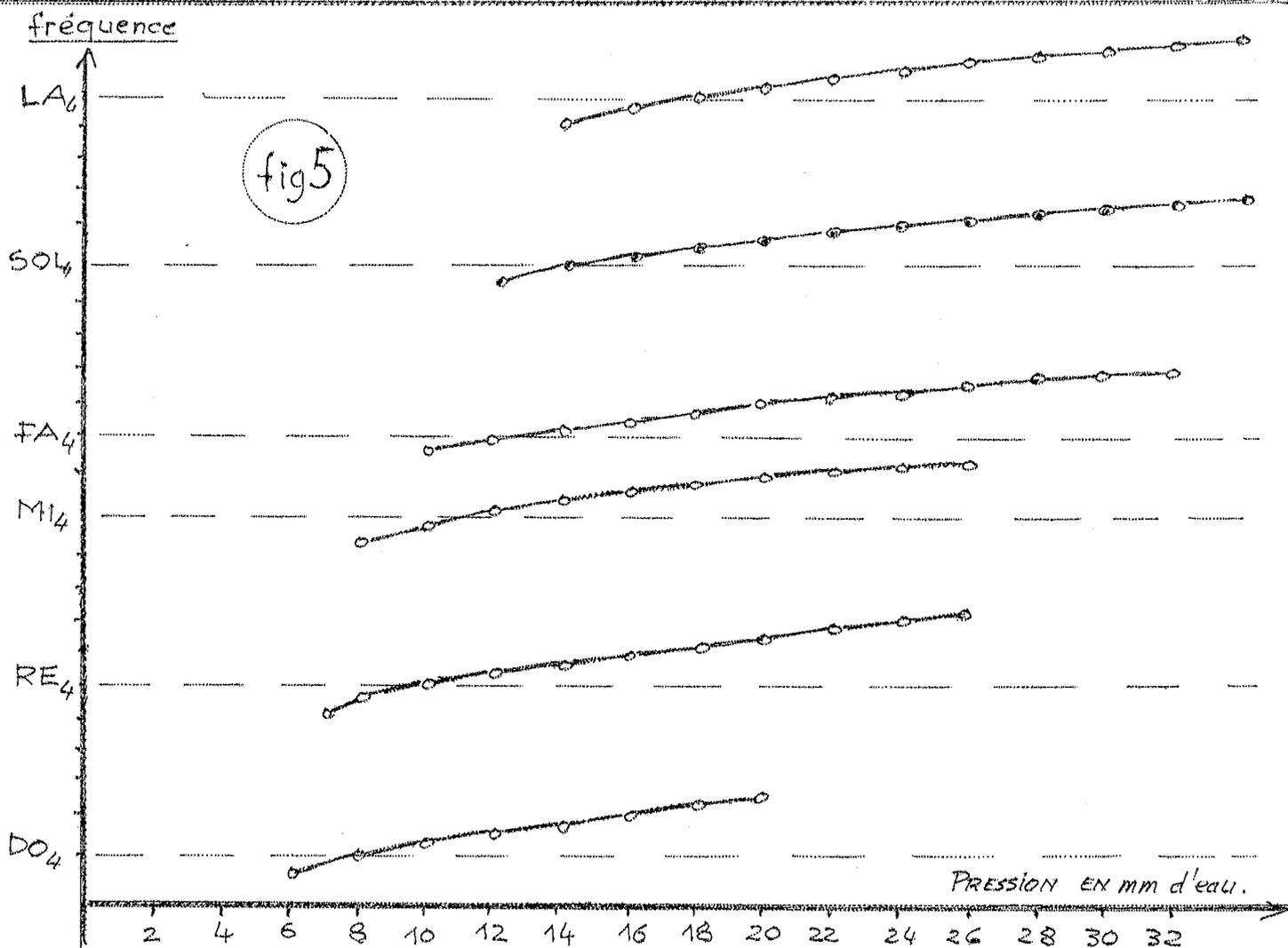
Dans un tuyau théorique, les partiels sont, comme les harmoniques, des multiples du fondamental. Or une flûte est loin d'être un tuyau théorique et on constate des écarts plus ou moins importants entre les partiels et les harmoniques selon les caractéristiques de l'instrument. La justesse des partiels conditionne le timbre qui sera d'autant plus riche que ceux-ci seront plus proche des harmoniques.

a) Rôle de la taille

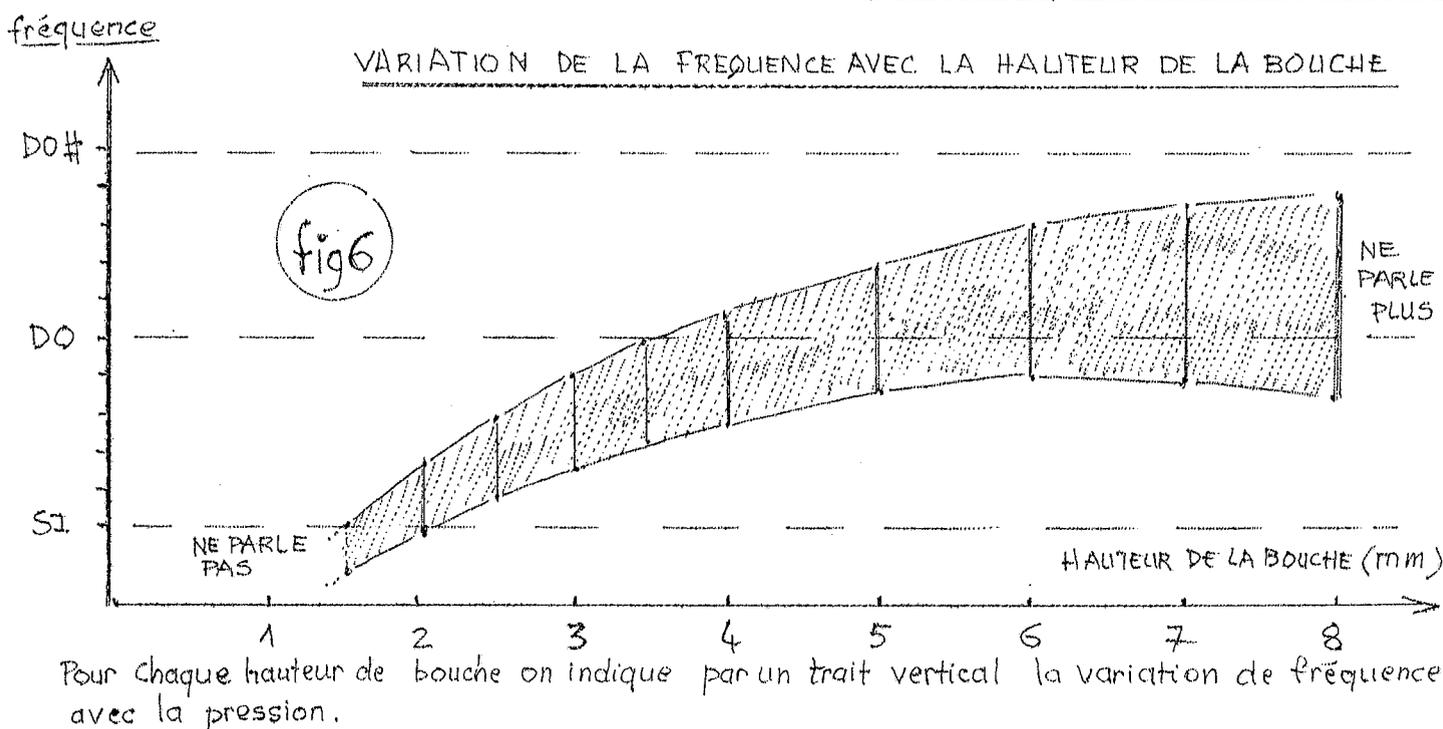
Nous appelons " taille ", le rapport du diamètre à la longueur du tuyau.

Soit un tuyau muni d'une embouchure de flûte à bec; on raccourcit graduellement la longueur et on relève la fréquence des partiels pour différentes longueurs du tuyau. En prenant le partiel 1 comme référence on porte sur un graphique l'écart des partiels 2, 3, 4, etc... avec les harmoniques correspondants (Fig.7).

...../

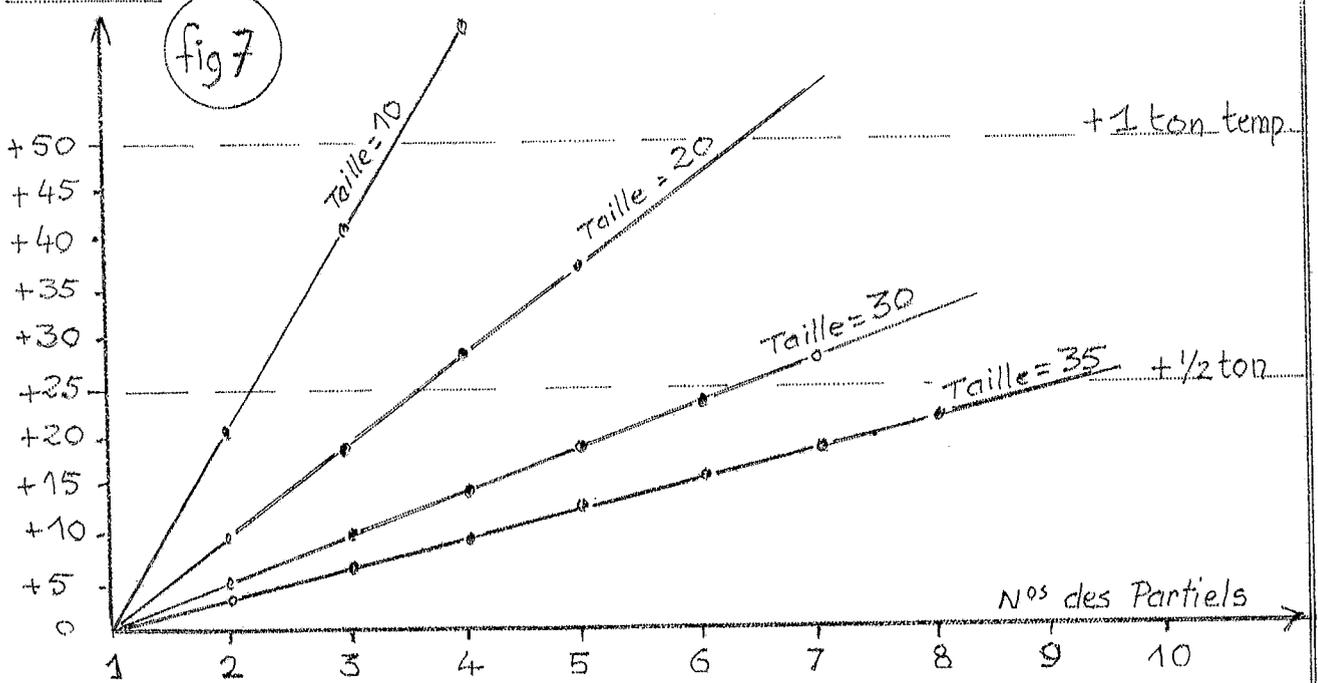


VARIATION DE LA FREQUENCE AVEC LA PRESSION (PIPEAU)



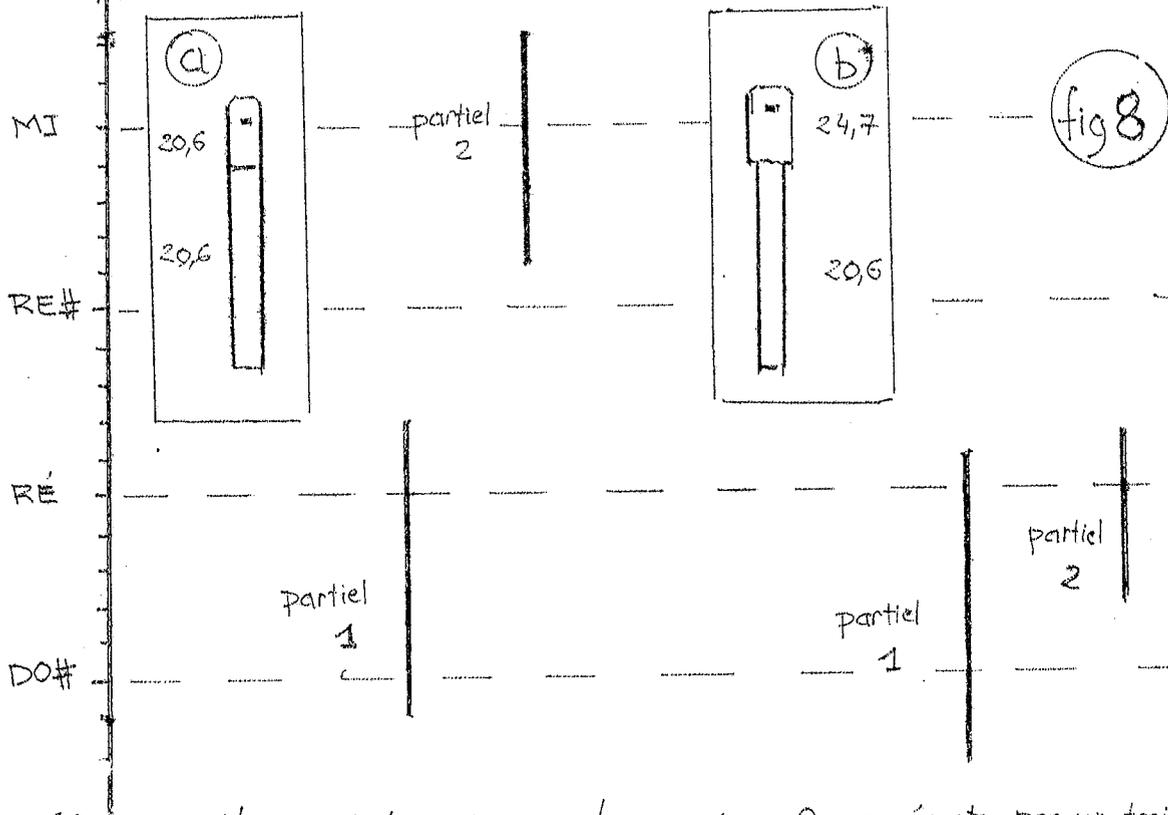
## RÔLE DE LA TAILLE DANS LA JUSTESSE DES PARTIELS.

SAVARTS



fréquence

## RÔLE DES DISCONTINUITÉS DE DIAMÈTRE.



La fréquence d'un partiel varie avec la pression. On représente par un trait vertical la zone d'existence de chaque partiel (champ de liberté en fréquence)

- Tuyau cylindrique. Diam. int. 20,6 mm, le partiel 2 qui devrait être à l'octave est beaucoup trop haut (1 ton environ)
- On remplace l'embouchure par une autre de diamètre plus grand - (24,7 mm). Cette fois le partiel 2 est juste.

On voit que les partiels sont d'autant plus faux que la taille est plus grande, et que la fausseté s'accroît avec le rang du partiel. Ceci justifie l'expérience des facteurs de flûtes ou de tuyaux d'orgue ; le galoubet qui utilise exclusivement des partiels a pour taille environ 37; la flûte traversière utilisant les régimes 1, 2 et 3 n'a que 32. Plus la taille est grande, plus le régime 1 devient faible et instable au profit des autres.

b) Rôle des discontinuités de diamètre du tuyau

Prenons un tuyau de diamètre intérieur 20 mm auquel nous raccordons successivement deux embouchures, l'une de même diamètre, l'autre d'un diamètre inférieur (18,8 mm). On relève la fréquence des partiels. On voit (Fig.8) qu'ils sont pratiquement justes dans le deuxième cas. On peut donc corriger la fausseté des partiels en introduisant des modifications dans la perce intérieure d'une flûte, à des endroits appropriés.

c) Place du bouchon de la flûte traversière.

La longueur pratique d'un tuyau est généralement comptée à partir du milieu de l'embouchure mais nous allons voir que dans le cas de la flûte traversière, la portion de tuyau comprise entre l'embouchure et le bouchon, joue un rôle important. Nous avons déjà pu constater à la projection du film d'ISING qu'il se produisait des tourbillons vers le fond du tuyau.

L'expérience suivante a été faite sur un tuyau expérimental; longueur 62,5 cm, diamètre 2 cm, trou d'embouchure circulaire de 1,2 cm. A l'aide d'un dispositif d'excitation expérimental simulant un flûtiste on relève la fréquence des partiels pour différentes positions du bouchon (fig.9).

Quand le bouchon (fig.9) est au milieu de l'embouchure, les partiels 2, 3 et 4 sont tous plus aigus que les harmoniques du fondamental 1. Comme nous l'avons vu précédemment pour un tuyau muni d'une embouchure de flûte à bec. Lorsqu'on écarte le bouchon, les partiels se comportent de façon diverses :

Le partiel 1 monte puis se stabilise à une certaine fréquence que nous avons prise comme référence. Les autres partiels montent ou descendent de sorte que lorsque le bouchon est à peu près à 2 cm du milieu de l'embouchure ils sont pratiquement comme les harmoniques du partiel 1.

Quand le bouchon est au-delà de 2 cm, la fréquence des partiels baisse régulièrement et d'autant plus que le partiel est de rang plus élevé. La " bonne zone " (bouchon vers 2 cm) correspond au timbre le plus riche, car l'accommodation des partiels sur les harmoniques se produit au mieux, avec



Nous avons ainsi entendu un exemple de Tulinca Roumaine, flûte de facture très simple, de grande taille, sans embouchure ni trous, dans laquelle le musicien utilise les partiels.

Mais un tel instrument est relativement " pauvre " musicalement; les premiers partiels, faciles à émettre, sont à de grands intervalles l'un de l'autre et plus on s'avance dans la série, plus il est difficile de choisir à coup sûr celui que l'on désire. Enfin, il est difficile de jouer une autre échelle musicale que celle qui est formée par la suite des partiels.

Pour émettre avec le même tuyau d'autres sons que ceux indiqués plus haut, les musiciens utilisent depuis longtemps les trous latéraux.

### C - LE PROBLEME DES TROUS LATERAUX

Il est plus facile de percer des trous que d'expliquer les effets qu'ils produisent... La théorie nous apprend que percer un trou revient à couper le tuyau à cet endroit; mais ceci n'est vrai que pour un trou dont le diamètre est égal à celui du tuyau, et même dans ce cas, l'expérience montre que le son obtenu est toujours plus bas que celui que l'on obtiendrait en coupant le tuyau.

Dans la pratique lorsqu'on perce un trou latéral dans un tuyau, la fréquence du son fondamental monte d'une certaine quantité qui dépend :

- de la place du trou par rapport à l'embouchure
- de la forme et des dimensions de ce trou.

L'expérience suivante va nous permettre de poser le problème.

#### 1 - Place, diamètre des trous et justesse des partiels.

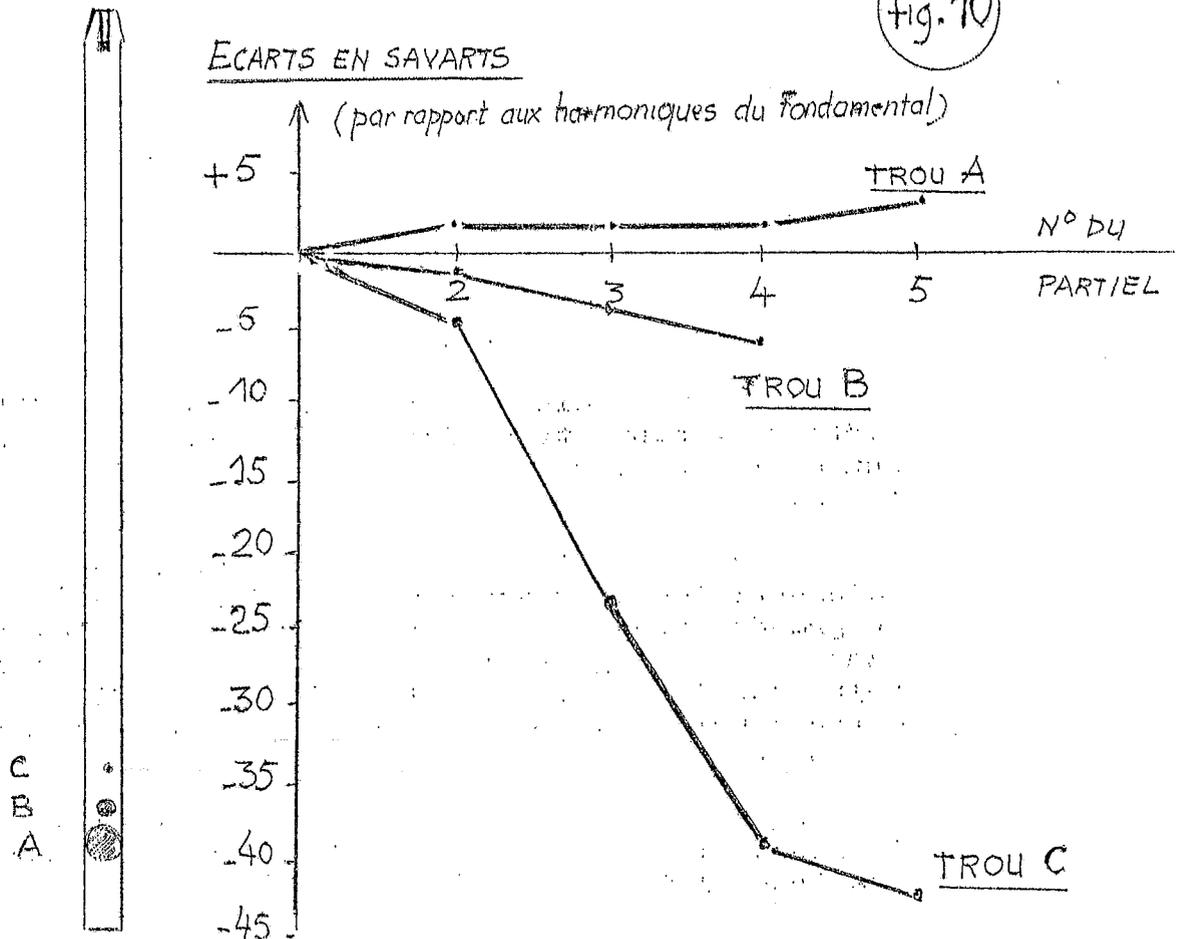
On prend un tuyau cylindrique ( $L = 65$  cm,  $D = 2$  cm) à l'extrémité duquel on réalise une embouchure de flûte à bec. Ce tuyau a pour son fondamental  $Sib_2$ . On se propose de percer un trou donnant un son situé un ton plus haut, soit  $Do_3$ , et on choisit pour ce trou trois positions possibles (fig. 10).

- a) Le trou est situé vers le bas aux  $8/9$  de la longueur du tuyau, rapport inverse de celui des fréquences ( $DO/Sib = 9/8$ ). Il faut agrandir démesurément le trou pour obtenir la hauteur voulue et il n'est plus possible de le boucher avec les doigts.

Les partiels sont pratiquement comme la suite des harmoniques.

...../

fig. 10



- b) Le trou est situé à environ 2 cm au-dessus du centre du précédent. Il n'a plus que 1 cm de diamètre, mais seuls les 5 premiers partiels sortent et ils sont plus bas que les harmoniques corrélatifs.
- c) Le trou est situé à environ 6 cm au-dessus du centre du premier trou. Il a 0,45 cm de diamètre. Le deuxième partiel est plus bas que l'octave et les autres sont tout à fait faux.

Dans la pratique on doit donc réaliser un compromis entre la place idéale du trou (qui divise le tuyau en parties dont les longueurs sont comme l'inverse du rapport des fréquences du son que l'on veut obtenir au fondamental) et la surface de ce trou qui ne doit pas être trop grande si on doit le boucher avec le doigt. En remontant légèrement le trou par rapport à sa place idéale, les partiels sont encore suffisamment justes pour être utilisés et le diamètre du trou est plus petit.

Ceci n'est valable que pour un seul trou. Avec plusieurs trous les problèmes deviennent très compliqués, car les portions de tuyau comprises entre les trous débouchés ("bouts morts") sont autant de résonateurs différents qui réagissent plus ou moins sur la fréquence et le timbre des sons. La théorie tenant compte des

réactions réciproques des trous est très compliquée et reste à faire; elle devient envisageable avec les moyens modernes de calcul.

2 - Cas des flûtes n'utilisant que le partiel 1 (Le pipeau).

On se propose d'obtenir une échelle donnée en n'utilisant que le partiel 1. On prend un tuyau quelconque muni d'une embouchure de flûte à bec. En tenant le tuyau dans les mains, comme pour en jouer, on repère la place du bout des doigts sur le tuyau, qui sera celle des trous (6 à 8). On perce le premier trou, le plus éloigné de l'embouchure (en bas), que l'on agrandit peu à peu jusqu'à ce que l'on obtienne l'intervalle désiré avec le fondamental du tuyau. Laisant ce trou découvert on perce alors le deuxième que l'on agrandit de la même façon. Et ainsi de suite. On tient donc implicitement compte des interactions des trous entre eux. Que les trous soient sur des génératrices différentes n'a aucune importance. On obtient finalement une suite de sons donnant l'échelle désirée et le timbre peut être très agréable. Le seul inconvénient est une étendue restreinte. Les partiels 2 et 3 s'ils existent sont généralement fort éloignés de l'octave et de la quinte des fondamentaux, et ne permettent pas de reproduire l'échelle à l'octave, sauf par le moyen de fourches qui rendent le jeu malaisé.

3 - Cas des flûtes utilisant les partiels 2 et 3 (Flûte à bec, flûte traversière).

La facture de l'instrument doit tenir compte de certains impératifs. On choisit un tuyau parfaitement cylindrique, de grande taille (diamètre petit par rapport à la longueur), environ 30. Si la taille est trop grande, les sons graves sortent pour des pressions très faibles et sont instables et peu intenses. On perce les trous empiriquement, par tâtonnements et rectifications successifs en cherchant un compromis entre la place théorique, l'écartement des doigts et la surface que l'on peut boucher avec les doigts.

D - CAS DES TUYAUX CONIQUES

La théorie admet qu'un tuyau cône ouvert à sa base et fermé ou ouvert au sommet se comporte comme un tuyau cylindrique ouvert aux deux extrémités, donc, à longueur égale, il a la même fréquence fondamentale et la même série de partiels.

Mais les corrections aux extrémités que l'on doit faire intervenir pour appliquer la théorie à la pratique instrumentale sont différentes si l'on embouche le tuyau par le gros ou par le petit bout. Dans le cas des flûtes on emploie généralement des tuyaux dont le diamètre va en se rétrécissant de la bouche vers l'extrémité ouverte.

Si on compare deux flûtes à bec ayant même bouche, même longueur et même diamètre au niveau de la bouche on peut faire diverses observations :

- La flûte cônica donne un son plus grave, l'abaissement du son dépend du degré de cônicité.

- Si on veut percer un trou donnant un certain intervalle avec le fondamental, on devra, à surface égale, le placer plus près de l'embouchure, sur un tuyau cônica que sur un tuyau cylindrique.

Ces deux constatations justifient l'emploi de tuyaux côniques pour des instruments nécessitant un tuyau assez long (sans graves), l'intérêt essentiel étant de pouvoir rapprocher les trous que l'on bouche avec les doigts de la main et de les percer plus petits. On évite ainsi les écarts trop grands de doigts, bien que les partiels soient moins justes que ceux d'un tuyau cylindrique.

Beaucoup d'expériences concernant le problème des trous et celui de la cônicité sont à reprendre ou à compléter. On trouvera de nombreux éléments dans les ouvrages de BOUASSE (Bib. 2 p. 358).

Nous avons maintenant suffisamment de données pour comprendre les raisons de l'évolution historique de la flûte traversière et les changements qu'elle a subi dans sa facture, principalement au siècle dernier.

E - DIFFERENTS TYPES DE FLUTES

Il y a bien des manières d'exciter un tuyau par une lame d'air mais on peut classer les instruments dans deux grands groupes principaux :

a) Excitation du tuyau par l'extrémité supérieure

- Tuyau bouché à un bout :

LA FLUTE DE PAN est sans doute un des instruments à les plus anciens. En recouvrant partiellement l'extrémité ouverte du tuyau on souffle sur le bord biseauté. Les partiels sortent difficilement, aussi multiplie-t-on les tuyaux pour donner autant de fondamentaux différents. Un artiste habile peut enchaîner en continu les hauteurs en jouant sur la pression et sur le recouvrement du trous comme le montrent aujourd'hui les musiciens roumains.

- Tuyau ouvert aux deux bouts

LE NEY (ou Naï). Comme la flûte de pan, le tuyau ne comporte pas d'embouchure toute faite; on souffle sur le bord, mais la position de la bouche est fort différente. Le musicien est entièrement maître de l'excitation (forme de la lame d'air, distance lumière-biseau, forme et section de l'ouverture etc...) il a donc un très grand nombre de possibilités pour varier la forme de l'onde sonore, mais l'apprentissage est difficile.

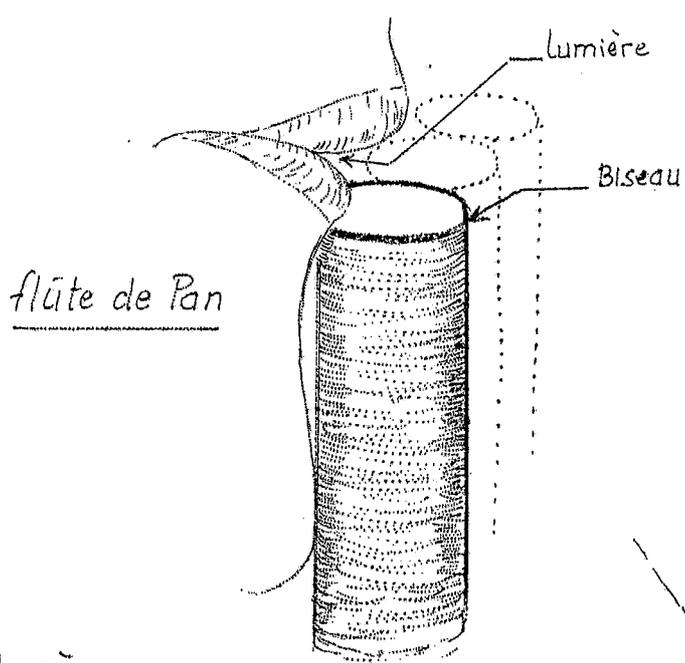
FLUTE A ENCOCHE (quena, shakuhachi etc...)

Le tuyau comporte à son extrémité supérieure une découpe rectangulaire ou en demi-lune amincie en forme de biseau; le joueur recouvre presque entièrement l'extrémité supérieure et envoie la lame d'air sur ce biseau. Il dispose aussi pratiquement de tous les paramètres.

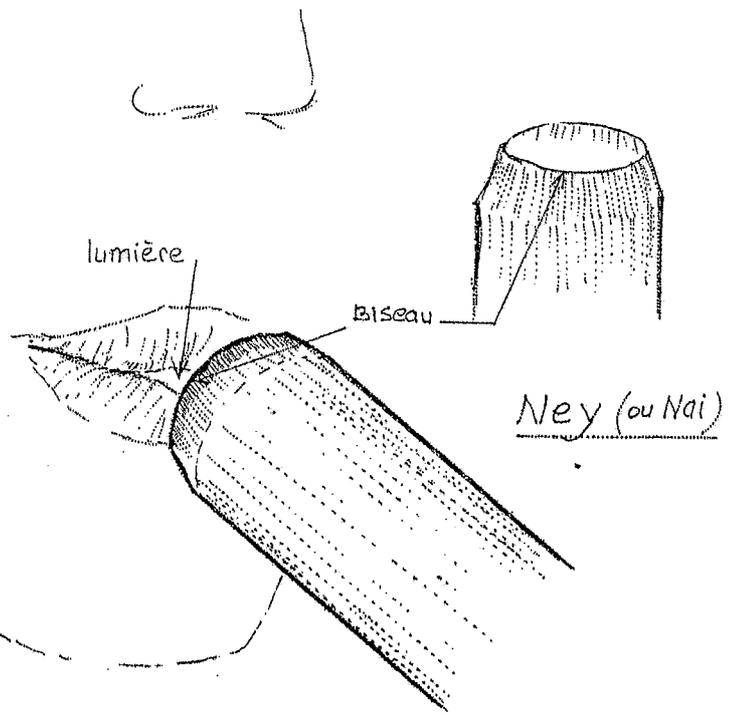
FLUTE & BEC - TUYAUX D'ORGUE A BOUCHE. De facture beaucoup plus élaborée que les précédentes la flûte à bec comporte un organe spécial pour faire le son : le sifflet, ce qui en rend le jeu beaucoup plus aisé. En revanche le musicien ne peut plus agir que sur les variations de pression au moment de l'attaque (coup de langue) et en cours de jeu, ce qui entraîne de variations de hauteur (jouer plus fort = jouer plus haut). Le timbre des sons est déterminé en grande partie par l'instrument.

b) Excitation du tuyau par un trou latéral

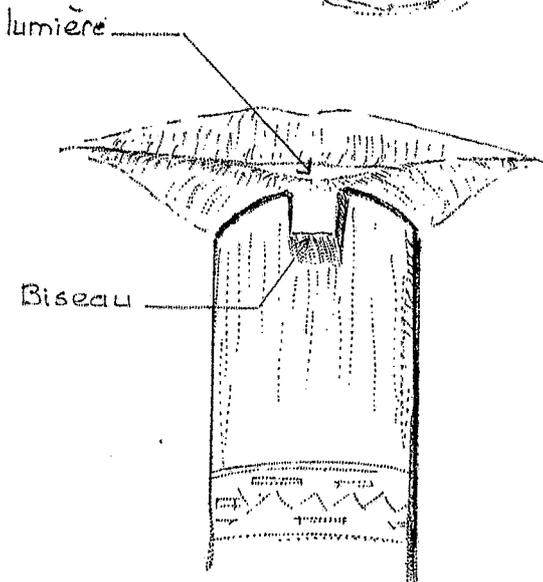
FLUTE TRAVERSIERE. L'instrument existe dans de nombreux pays et sous diverses formes. Le trou d'embouchure est situé près d'une extrémité bouchée ou non comme dans le cas du NEY. Le musicien est entièrement maître de l'excitation.



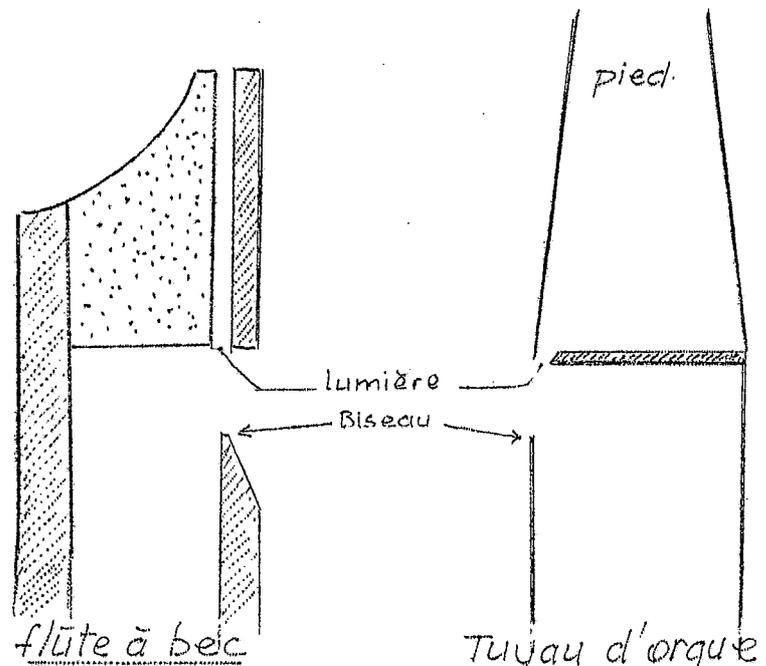
flûte de Pan



Ney (ou Nai)

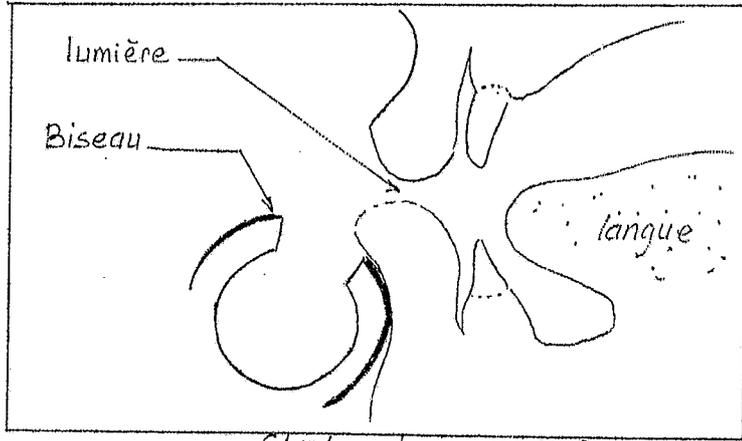


flûte à encoche (Quena)



flûte à bec

Tuyau d'orgue



flûte traversière

DIFFERENTS TYPES  
D'EMBOUCHURES  
DE FLÛTES

III - LA FLUTE TRAVERSIERE

A - HISTORIQUE

1 - Jusqu'à Boehm

L'instrument est connu depuis la plus haute antiquité et a évolué différemment selon les pays. On le trouve en Chine, au Japon en Afrique et dans tous les pays Européens. En France, au Moyen Age, c'est la " traversaine " par opposition à la flûte à bec, dite " doussaine ". A partir du 16<sup>e</sup> siècle nous disposons de traités des instruments de musique.

1511 - A Bâle paraît le " Musica Getutsch " de S.VIRDUNG. On y trouve la figure d'une flûte traversière (Zwerchpfeiff) de taille très fine, ayant 6 trous latéraux, mais aucune indication supplémentaire n'est donnée dans le texte.

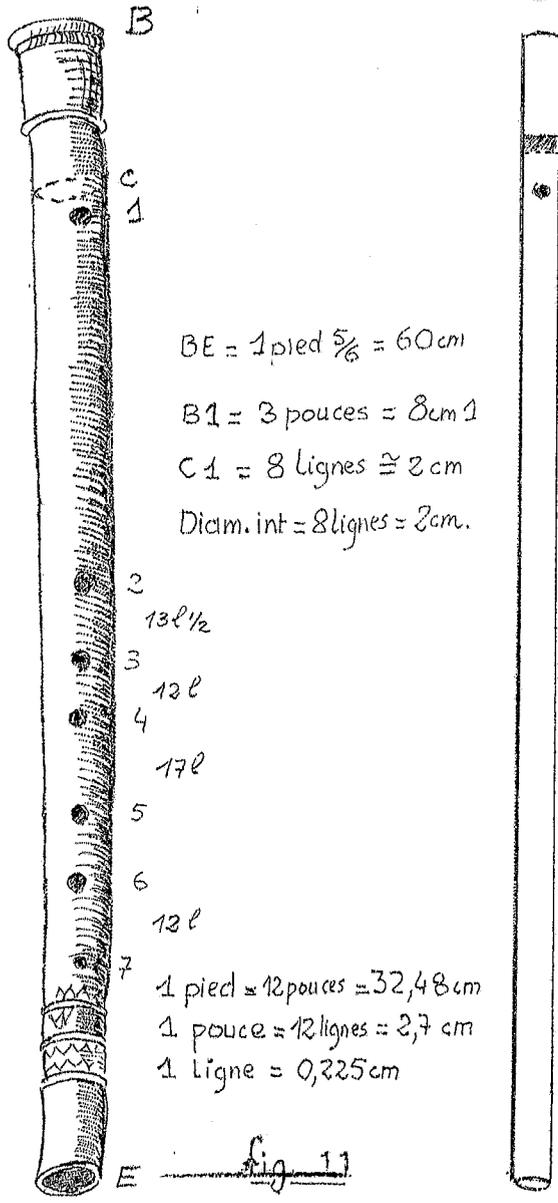
En 1556, Philibert JAMBE DE FER publie à Lyon " L'Epitome musical des Tons, Sons et Accords des voix humaines, fleuste d'Alleman, fleustes à neuf trous, Violes et Violons ". La fleuste d'Alleman est la flûte traversière. On y apprend que l'instrument a 6 trous (aucun derrière) et peut fournir " ... 15 à 16 tons bien naturels et non par trop contraincts ni forces, mais au-dessus jusqu'à dix neuf, ils sont forts, cruz, et rudes, pour la véhémence du vent qui y est nécessaire ... " ce qui donne en pratique 2 octaves (Fondamentaux et partiel 2) et quelques notes de l'octave 3 (Partiel 3); cette étendue devait varier avec l'instrument et avec l'habileté du musicien. L'auteur donne le détail de la tablature mais aucune mesure métrique.

1818 - A Wolfenbuttel (Allemagne) est publié le " Syntagmatis Musicum " de PRAETORIUS. Les dessins qui y figurent présentent un intérêt particulier du fait qu'il comportent une échelle et ont été dessinés suivant le principe de la chambre noire de Porta. Sur la planche représentant les flûtes de l'époque on est frappé par le nombre et la diversité des flûtes à bec dont c'est l'apogée. La flûte traversière (Querflöte) existe en trois tailles : Basse, Tenor, Cant, à la quinte l'une de l'autre.

On n'a aucune indication sur la perce intérieure, le diamètre et la place exacte des trous.

1636 - " L'Harmonie Universelle " du Père Marin MERSENNE. Cet ouvrage est capital pour l'histoire des instruments en France au 17<sup>e</sup> siècle. Nous trouvons (Proposition IX du Livre V) : " Expliquer la figure, l'étendue et la tablature de la Flûte d'Alleman et du Fifre "; L'instrument ne semble pas avoir évolué depuis JAMBE DE FER : 6 trous, étendue de deux octaves et demi au maximum, mais MERSENNE nous donne

...../



BE = 1 pied  $\frac{5}{6}$  = 60 cm  
 B1 = 3 pouces = 8 cm  
 C1 = 8 lignes  $\cong$  2 cm  
 Diam. int = 8 lignes = 2 cm.

2 13 l  $\frac{1}{2}$   
 3 12 l  
 4 17 l  
 5  
 6 12 l  
 7

1 pied = 12 pouces = 32,48 cm  
 1 pouce = 12 lignes = 2,7 cm  
 1 ligne = 0,225 cm

fig. 11

DESSIN DONNÉ  
 PAR MERSENNE

FLÛTE DESSINÉE  
 D'APRÈS LES DIMENSIONS

des dimensions (fig.11). Si nous redessinons l'instrument avec les dimensions de MERSENNE la figure n'a plus du tout la même allure... ce qui peut nous conduire à nous méfier des reconstitutions d'instrument anciens d'après des gravures !

Ainsi présentée cette flûte est fort proche de notre flûte classique actuelle : " Elle est percée d'une égale grosseur tout au long", donc cylindrique, de grande taille  $60/2 = 30$ . Malheureusement il manque juste une dimension, la distance du trou 2 à l'embouchure pour retrouver la disposition approximative des trous.

Le passage suivant extrait du texte de MERSENNE nous explique le peu de succès de la flûte traversière : "... Il est beaucoup plus difficile de faire parler cette Fluste que les autres qui s'embouchent en haut, car tous peuvent user de celle-ci, et peu savent sonner de celle-là, à cause de la difficulté que l'on trouve à disposer les lèvres comme il faut sur le premier trou, qui sert de lumière ... " (Nous dirions, embouchure, car nous employons dans ce travail le mot lumière dans un tout autre sens).

Enfin leur matière peut être " de prunier, de cerisier et autres bois qui se percent aisément... elles sont aussi fort bonnes de chrystal, ou de verre et d'ébène ".

En 1728 La situation a brusquement changé. Le traité de HOTTETERRE intitulé : " Principes de la flûte traversière ou flûte d'Allemagne, de la flûte à bec ou flûte douce, et du hautbois " accorde en fait la plus grande importance au premier instrument. On peut faire un parallèle entre l'adoption de la flûte traversière et l'évolution de la musique instrumentale à cette époque. Pendant tout le 18<sup>e</sup> siècle vont apparaitre et se développer les sonates et les concertos où les musiciens exploitent les possibilités particulières à chaque instrument. La flûte traversière laissant toute liberté au musicien pour agir sur l'excitation, offre plus de ressources, et est entrain de supplanter la flûte à bec. Elle a un autre avantage : on peut corriger les notes trop hautes ou trop basses en modifiant la couverture de l'embouchure.

L'instrument a été transformé. Autant que l'on peut le voir sur les figures de l'époque, la perce est cônica (gros bout vers l'embouchure); les facteurs de flûte à bec ont transposé à la flûte traversière les connaissances empiriques qu'ils avaient acquises sur les avantages d'une perce cônica pour la place et la dimension des trous. On note aussi un trou supplémentaire vers le bas, bouché par une clé actionnée par le petit doigt de la main droite permettant de produire le Ré# .

A partir de ce moment, la flûte traversière va être l'objet de perfectionnements divers (Bib. 5) :

- nouveaux trous (Fa naturel, sol# , Sib,) munis de clés, puis ut naturel aigu.
- patte d'ut (allongement du tuyau pour obtenir les sons graves Ut# et Ut).

On assiste à l'éclosion d'une littérature musicale importante jouée par des virtuoses qui nous ont laissé leurs noms : BLAVET, NAUDOT, QUANTZ, DEVIENNE etc... Le mérite de ces musiciens est d'autant plus grand que l'instrument est loin d'être parfait. L'augmentation du nombre des trous a permis d'éliminer la plupart des fourches mais le doigté reste compliqué, variable d'un instrument à l'autre; la justesse surtout laisse à désirer et il faut une grande habileté pour corriger les notes fausses.

Telle qu'elle se présente au début du 19° siècle, la flûte traversière ne peut plus évoluer; elle va alors subir une mutation véritable, un changement radical de sa conception.

## 2 - Perfectionnements apportés par BOEHM

Vers 1830, deux hommes s'attachent simultanément à perfectionner la flûte traversière : GORDON et Théobald BOEHM. Nous ne pouvons départager ici le mérite des deux hommes sur lequel les historiens sont d'ailleurs très divisés. Une chose est certaine, seul BOEHM a pu concrétiser ses idées et construire des instruments selon sa conception. Il était pour cela bien préparé, fils d'orfèvre et excellent flûtiste.

L'idée fondamentale de tous les essais qui aboutirent à la flûte actuelle est la suivante : trouver les positions et les dimensions des trous donnant une justesse et une sonorité optimum (nous savons que les deux sont liés) puis concevoir un mécanisme permettant de les boucher.

Jusqu'alors les six trous principaux étaient bouchés par les doigts, les clés ne servant que pour des trous supplémentaires (dièses et bémols). Nous avons vu qu'une perce cônica (base du cône vers l'embouchure) permettait de rapprocher les trous et de diminuer leur diamètre, comparativement

avec un tuyau cylindrique de même longueur. BOEHM abandonne cette voie.

Après de très nombreux essais s'étendant sur plus de vingt ans pendant lesquels BOEHM joint la théorie acoustique élémentaire à la pratique (il essaye toutes sortes de perces et de dispositions de trous) la flûte apparaît sous sa forme définitive :

a) La perce

- Tube cylindre,  $L = 60,6$  cm, Diamètre = 19 mm

On revient à la flûte décrite par MERSENNE...

- Le tube se rétrécit graduellement du quart supérieur jusqu'à l'embouchure, d'environ  $1/10$  de son diamètre. Nous avons vu plus haut (II-B 2b) que des modifications dans le diamètre intérieur d'un tuyau cylindrique changeaient la justesse relative des partiels. Nous avons comparé, toutes choses égales, les partiels d'une flûte traversière munie d'une part de sa tête originale, pratiquement cônica, etc d'autre part d'une tête cônica. On constate que les partiels 2 et 3 sont physiquement beaucoup plus faux avec une tête cônica; ils sont beaucoup trop hauts. Mais il convient de remarquer que la perception des hauteurs n'est pas une chose simple. Dans le cas de la tête cylindrique, les partiels sont pratiquement comme les harmoniques, or ils paraissent trop bas à l'oreille; il faut les jouer un peu trop haut pour qu'ils soient justes. D'autre part, avec la tête cônica les partiels supérieurs, bien que trop hauts sortent plus facilement et avec plus d'intensité. Or nous savons que la richesse du timbre est liée à leur présence. Cette expérience confirme les constatations de BOEHM lui-même (Bib. 6). " Un rétrécissement plus ou moins important de la perce de la partie supérieure du tube de la flûte et un raccourcissement ou un allongement de ce rétrécissement ont une influence importante sur la production des sons et sur l'accord des octaves ".

Mais BOEHM ajoute que ce rétrécissement n'est pas simplement cônica; la coupe doit affecter l'allure d'une parabole. Nous envisageons d'expérimenter prochainement sur ce point qui est l'objet de contestations. Quoiqu'il en soit les facteurs de flûte accordent une grande importance à la forme du rétrécissement de la tête ce qui leur cause des problèmes compliqués d'étirement du tube; M. LEFEVRE nous en rend compte à la fin de ce travail. Or notre opinion au laboratoire est que ces mêmes facteurs ne se donneraient pas tant de mal si la forme du rétrécissement ne jouait aucun rôle acoustique...

Nous avons effectué plusieurs relevés sur des têtes de flûtes traversières obligeamment prêtées par Mlle NOUFFLARD (Fig.12). A l'aide d'un comparateur de précision on mesure le diamètre intérieur du tube tous les  $1/2$  cm. Comme celui-ci est fortement ovalisé on prend le maximum puis le minimum

.... /

et on retient arbitrairement la moyenne arithmétique des deux valeurs.

PERCE INTERIEURE DE LA TÊTE DE LA FLûTE TRAVERSIERE

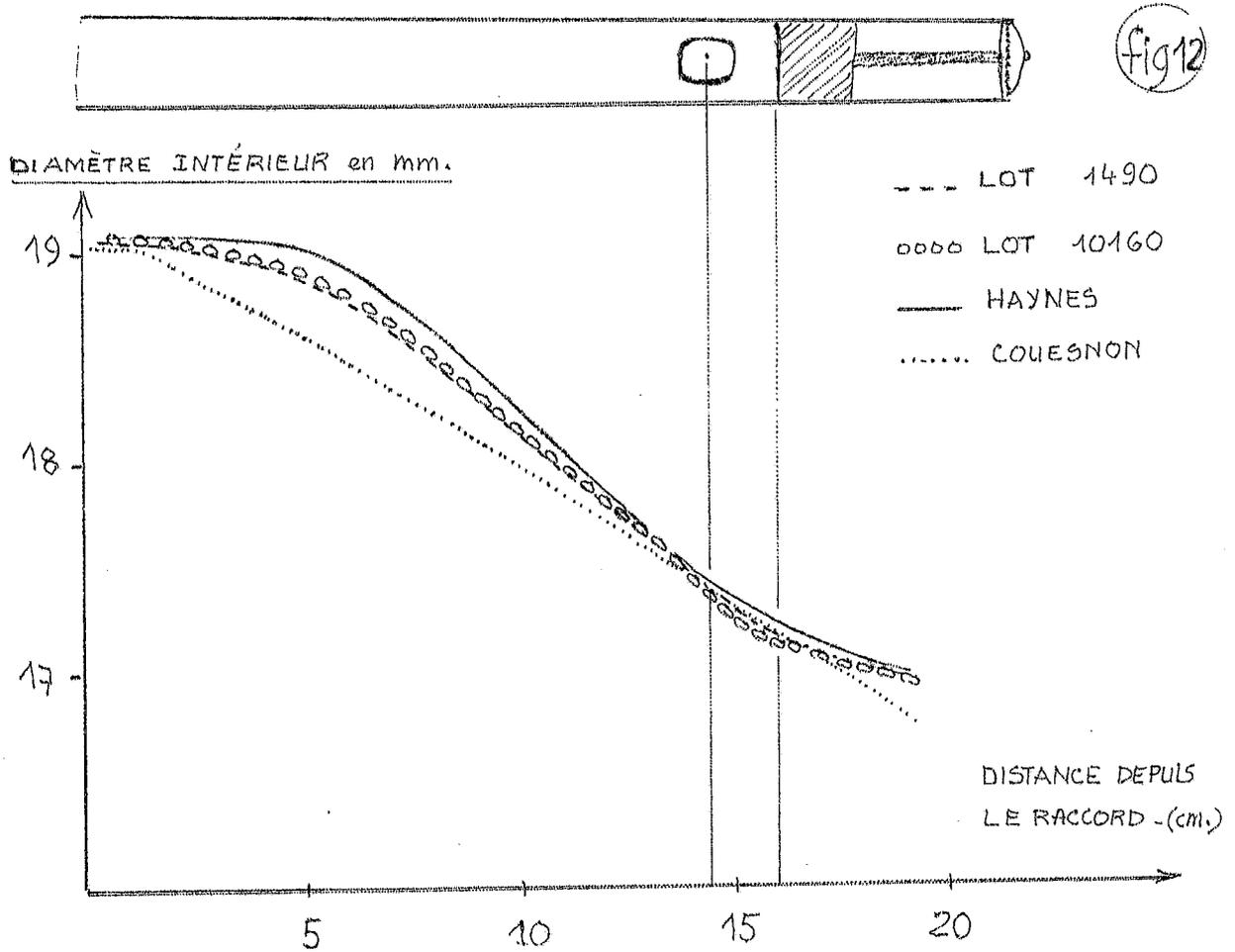


Figure 12

On constate :

- une remarquable continuité dans l'allure du rétrécissement pour un même fabricant à plus de 80 années d'intervalles comme en témoignent les N°s des instruments (LOT).

- des différences sensibles selon les fabricants.

b) Place du bouchon

Le bouchon est placé à 17 mm du centre de l'embouchure. Nous avons vu également l'importance de cette question quant à la justesse et à la sonorité. BOEHM recommandait un bouchon mobile permettant d'ajuster sa position selon les notes que l'on joue... ce qui est irréalisable dans la pratique. Il a

...../

donc défini cette position " moyenne " fixe, qui, remarquons-le, correspond au diamètre du tube à cet endroit, de même que dans la flûte de MERSENNE le bouchon était à 8 lignes du trou d'embouchure, même valeur que le diamètre de la flûte (8 lignes = 2 cm environ).

c) Les trous

La place et la dimension des trous tels qu'il les décrit dans son ouvrage sont le résultat d'un compromis entre la théorie et les nombreuses expériences auxquelles s'est livré BOEHM. Il a remarqué en particulier que les trous devaient être les plus grand possible. Dès lors il n'était plus question de les boucher directement avec les doigts.

d) Le mécanisme

Les conclusions les plus intéressantes de BOEHM sur le plan acoustique n'auraient eu aucune suite s'il n'avait été capable de concevoir une mécanique robuste, simple, donnant des doigtés faciles à enchaîner les uns aux autres. Sur ce point, BOEHM a été favorisé par ses connaissances en orfèvrerie et par les ouvrier cleftiers de la maison Godefroy.

La flûte a 15 trous d'assez grand diamètre (15 mm) et nous n'avons que neuf doigts. Pour réduire la surface réelle de bouchage par le bout du doigt BOEHM dispose des anneaux laissant une ouverture de 7 mm en leur centre; ces anneaux sont relevés en permanence grâce à des ressorts d'acier.

Les autres trous, sont bouchés indirectement au moyen de plateaux solidaires d'axes de transmission longitudinaux. Ce système rappelle les " abrégés " de la mécanique de l'orgue. Il offre l'avantage de transmettre en toute sécurité (les tiges ont une grande résistance à la torsion) un mouvement à grande distance; Ex : la petite clé de cadence du SI  $\natural$  aigu actionne un tampon situé 25 cm plus haut. D'autre part on pourra par un seul doigt fermer plusieurs trous, tous ceux dont les tampons sont solidaires d'un même axe. On se rappellera que la " levée " conditionne la hauteur du son (trou partiellement bouché).

Les perfectionnements acquis pour la flûte seront transposés à d'autres instruments (hautbois, clarinette, basson, etc...) dont les doigtés seront ainsi grandement facilités.

En résumé, la flûte traversière a subi, en l'espace de 40 ans de profondes modifications, qui lui ont permis de gagner en sonorité, en étendue et surtout en aisance de jeu, ce qui conditionne directement la virtuosité. L'instrument de BOEHM ne s'est pourtant pas imposé immédiatement. Les flûtes côniques à 5 ou 8 clés ont longtemps coexisté avec la nouvelle

flûte cylindrique. Celle-ci était indifféremment de bois ou de métal. BOEHM préférait personnellement l'association tête de bois-corps métallique. Nous reviendrons plus loin sur cette question du matériau.

Certes, la flûte traversière actuelle est loin d'être parfaite, en particulier sur le plan de la justesse, et de l'homogénéité du timbre, mais moyennant un certain entraînement un artiste habile corrige ces défauts. La flûte traversière a acquis maintenant une place de premier choix parmi les instruments solistes de l'orchestre.



## B - INTERET MUSICAL DE LA FLUTE TRAVERSIERE

Nous savons (bib.7) qu'un instrument de musique est d'autant plus intéressant qu'il offre de possibilités pour varier la durée, la hauteur, l'intensité et le timbre indépendamment l'un de l'autre. Nous appellerons " champ de liberté " l'étendue des variations possibles dans chacun de ces domaines.

### 1 - Champ de liberté des durées

La limite maximale en ce domaine est donnée par le souffle humain; elle varie selon les individus et peut s'accroître par un entraînement approprié. Ceci est un point capital pour la pédagogie de l'instrument car la maîtrise et l'économie du souffle sont indispensables pour conduire une phrase musicale.

C'est aussi la physiologie humaine qui limite la durée du côté des plus petites valeurs. Qu'il s'agisse de la répétition de la même note ou de l'enchaînement rapide de sons successifs les musiciens ne dépassent guère 14 à 16 sons par seconde soit une durée minimum d'environ 60 ms. On retrouve d'ailleurs ces chiffres pour d'autres instruments.

### 2 - Champ de liberté des intensités.

Du point de vue physique, la flûte ne dispose pas, comme la cornemuse ou le cor de chasse d'une grande puissance acoustique. La pression nécessaire est relativement faible : 1 à 10 cm d'eau en moyenne, 10 à 20 cm d'eau pour les notes de la 3ème octave en FF, mais le débit peut être très grand. D'autre part, on sait que l'intensité physiologique dépend avant tout de la répartition de l'énergie dans l'échelle des fréquences (courbes de FLETCHER). Les analyses spectrographiques montrent que pour la flûte l'énergie est concentrée dans les 4 ou 5 premiers harmoniques soit, compte tenu de la tessi-

ture de l'instrument, entre 500 et 5000 Hz, la zone où l'oreille est la plus sensible et où elle discrimine le mieux les petites variations d'intensité.

Comment peut-on augmenter l'intensité ?

- en accroissant le débit de l'air sortant de la lumière. Dans ce but on peut agir soit sur la pression en l'augmentant, soit sur la lumière en diminuant sa section, soit sur les deux simultanément.

Mais l'accroissement du débit entraîne une montée de la fréquence; c'est ce qui se produit dans la flûte à bec. L'intérêt de la flûte traversière est de pouvoir compenser cette montée en fréquence en couvrant le trou de l'embouchure. Pour diminuer l'intensité on agira en sens inverse.

### 3 - Champ de liberté des hauteurs.

Par le même processus, il est possible de changer la hauteur des sons sans modifier leur intensité.

Il est intéressant de relever pour un instrument donné ce champ de liberté des hauteurs. On demande au flûtiste de jouer l'instrument pendant 4 à 5 minutes afin qu'il soit stabilisé en température. Puis il doit jouer une note, par exemple DO<sub>3</sub> et monter sa fréquence par tous les moyens possibles (débit, embouchure); on relève cette fréquence maximum, que

#### CHAMP DE LIBERTÉ DES HAUTEURS D'UNE FLÛTE TRAVERSIÈRE

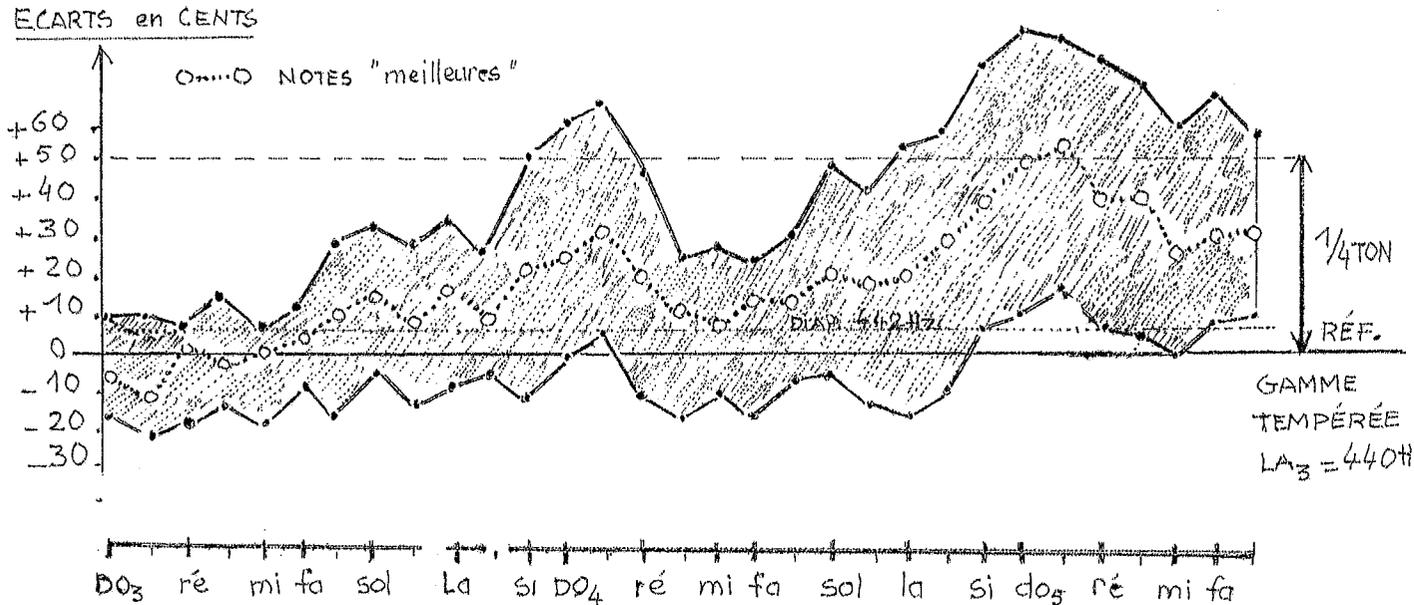


Figure 13

...../

l'on note en écart par rapport à la note correspondante de la gamme tempérée base LA 3 = 440 Hz (fig.13). De la même façon il baisse la note le plus possible. On relève la fréquence minimum. L'intervalle entre la valeur maximum et la valeur minimum est le champ de liberté de hauteur pour la note considéré. On fait de même pour toutes les notes de l'instrument.

Un tel relevé permet de tirer les constatations suivantes :

- Le champ de liberté des hauteurs est très grand :  $1/4$  de ton à un  $1/2$  ton suivant les notes. Ce point est important; il permet au musicien de faire des attractions mélodiques, un vibrato de fréquences et de lier convenablement les notes les unes aux autres.

- Le champ de liberté permet de juger objectivement de la justesse d'un instrument. Un instrument est juste quand on peut tracer une ligne horizontale traversant le champ de liberté; ce n'est pas le cas ici. Ainsi, à 442 Hz (ligne horizontale pointillée), le Do  $4$ , le Sol  $4$ , et toutes les notes de la troisième octave sont trop hautes. Pour un diapason plus élevé, c'est l'octave grave qui sera trop basse. Quel que soit le diapason auquel on le joue, un tel instrument ne sera jamais juste.

A l'intérieur du champ de liberté des hauteurs le musicien choisit les hauteurs qu'il désire, selon le contexte musical, selon le timbre qu'il veut donner. L'expérience montre que les notes dites " meilleures ", sont généralement à la limite supérieure du champ de liberté. Un flûtiste ne peut pas jouer juste sur une flûte fausse, mais l'inverse est toujours possible ...

Dans les musiques traditionnelles de divers pays où les instruments sont restés sans mécanique, les flûtistes modifient la hauteur principalement en couvrant plus ou moins les trous latéraux. Nous en avons eu un exemple particulièrement significatif en observant un flûtiste Japonais du théâtre Nô. En agissant à la fois sur l'embouchure, sur le débit et sur la couverture des trous latéraux il arrivait à produire des lignes mélodiques où la fréquence variait constamment et continuellement. La notion d'échelle (fréquences fixes) n'a aucun sens avec de tels instruments et il est inutile de vouloir tirer un renseignement quelconque de la disposition et de la section des trous.....

#### 4 - Champ de liberté des timbres

Le mot " timbre " n'a pas de définition précise. Selon que l'on parle du timbre de la flûte par opposition à celui du violon, du piano, etc.. ou des différents timbres d'une note de flûte on se place sur des plans différents.

...../

a) Le timbre de la flûte est l'ensemble des caractéristiques acoustiques communes à tous les sons fournis par cet instrument. C'est une notion statistique supposant un auditeur intelligent ayant élaboré à partir de tous les sons de la flûte une forme (au sens Gestalt) acoustique à trois dimensions; fréquence, durée, intensité. Pour une telle étude, un appareil d'analyse comme le sonographe est particulièrement adapté puisqu'il fournit sur un même document l'évolution de la fréquence en ordonnée, par rapport à la durée, en abscisse, et l'évolution concomitante de l'intensité représentée par la noirceur et l'épaisseur des traits de l'image. On demande au musicien de jouer une gamme chromatique et l'on a ainsi une idée globale, statistique du timbre de l'instrument. L'intérêt du sonographe est confirmé dans la pratique par le fait qu'un musicien peut rapidement faire la corrélation entre l'image mentale qu'il a du timbre d'un instrument et le document. Nous sommes à même, au laboratoire, de reconnaître à la vue d'un sonagramme, n'importe quel instrument de musique.

Le timbre de la flûte a les caractéristiques suivantes :

- harmoniques relativement peu nombreux (12 à 15 au maximum)
- intensité concentrée dans les premiers harmoniques
- temps d'établissement du son (transitoire d'attaque) relativement long : de 50 à 100 ms pour les notes de l'octave grave accompagné ou non de bruit selon la forme de l'attaque.

A l'intérieur de ce cadre général des variétés infinies de timbre existent qui dépendent soit de l'instrument, soit du flûtiste.

b) Variations de timbre dépendant de l'instrument.

La forme du tuyau, les longueurs de tuyau (bouts morts) au-delà des trous ouverts, la position du bouchon, la place et la section des trous conditionnent le nombre et la justesse des partiels, donc le timbre. Dans la flûte traversière actuelle ces données sont pratiquement normalisées à la construction et ne sont plus à l'origine de variations importantes de timbre, d'un instrument à l'autre. Il n'en est pas de même pour les points suivants :

- Etat du biseau. L'état du biseau (tranchant, arrondi, strié, etc...) réagit sur la loi d'écoulement de l'air à ce niveau, donc sur le timbre.
- La pente intérieure de la cheminée (fig. 14) forme avec un plan perpendiculaire passant par le grand axe de l'embouchure un angle plus ou moins grand. De plus ce n'est pas une simple oblique mais une courbe plus ou moins compliquée. On note d'assez grandes différences selon les instruments car cette partie de l'embouchure est faite à la main et de plus certains artistes procèdent

...../

à des " retouches ". La forme de la pente intérieure de la cheminée joue certainement un rôle important sur les enrroulements et les tourbillons qui se forment à cet endroit. Des expériences systématiques restent à faire.

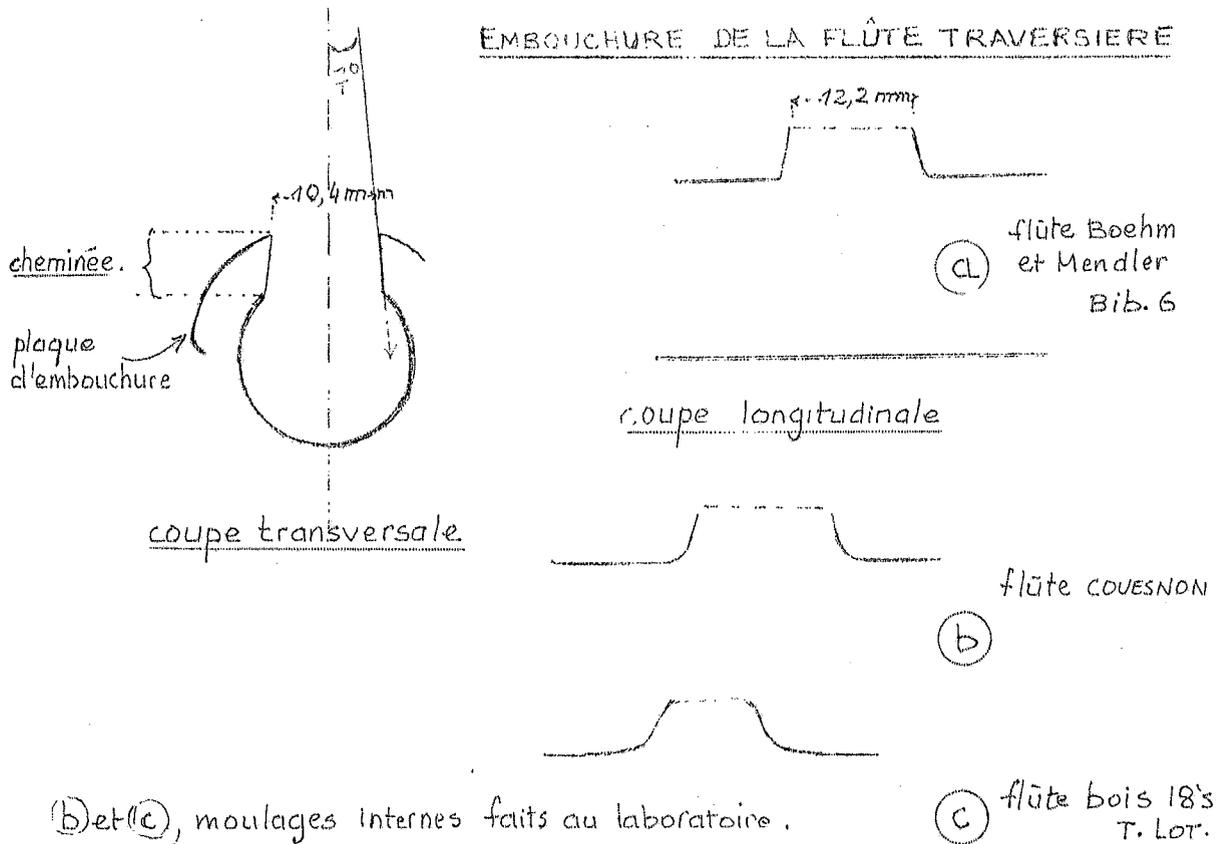


Figure 14

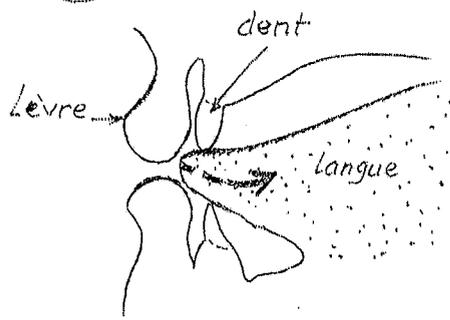
- Anneaux et plateaux. Il n'est pas indifférent de boucher un trou avec un plateau, ou avec le doigt + anneau. Dans le premier cas le bouchage et le débouchage sont francs et brusques. Dans le deuxième cas, l'opération se fait en deux temps : le doigt obture le centre de l'anneau maintenu relevé par un petit ressort, puis entraîne celui-ci pour boucher complètement le trou. Or le mode d'obturation des trous conditionne les transitoires d'attaque et d'extinction dans les passages joués en legato, donc le timbre, ce qui est confirmé par l'avis de nombreux musiciens.
- Rôle du matériau. BOEHM consacre un chapitre spécial de son ouvrage sur le rôle du matériau. Il conclut que les sons de la flûte seront d'autant plus aisés à produire que le tube sera plus léger, donc plus mince.

On peut poser le problème de la façon suivante. Le matériau peut jouer un rôle pour deux raisons différentes : au niveau des parois, et au niveau de l'embouchure.

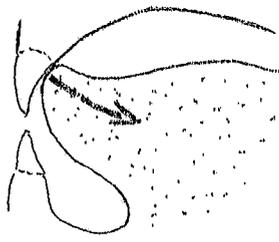
...../

fig 15

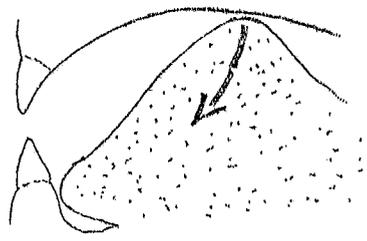
POSITION DE LA LANGUE DANS L'ARTICULATION DES COUPS DE LANGUE



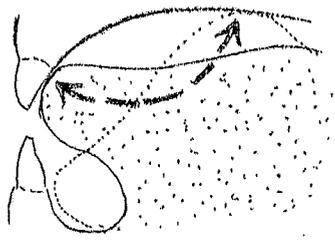
Te



te



Ke



te Ke

d'après le "Traité de la flûte"  
de René LE ROY

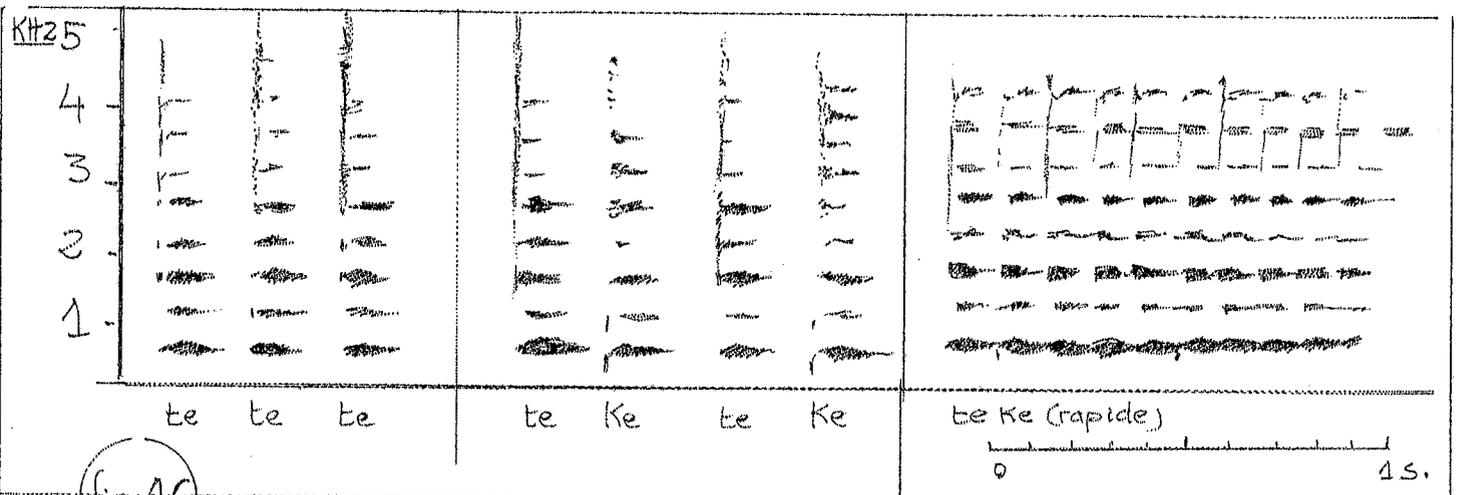


fig 16

ANALYSE AU SONAGRAMME DE QUELQUES TYPES D'ATTAQUES.

Lorsque les parois sont faites en un matériau peu rigide, en papier, par exemple, il se produit une action importante de celles-ci sur la vibration de la colonne d'air (Bib.2 chap. VI). On peut faire facilement l'expérience. On raccorde à une bouche de flûte à bec un tuyau de papier. Selon que l'on touche le tuyau en différents endroits, le son monte ou descend ou saute à un partiel; quelquefois on n'a plus de son du tout. On perturbe donc le système d'ondes stationnaires en touchant la paroi à un ventre de pression par exemple. D'autre part le son est toujours très faible : une partie importante de l'énergie est absorbée dans la mise en vibration des parois. Or on est loin de telles conditions avec un tube métallique même très mince, il n'y a pas de vibrations notable des parois. L'état de surface interne des parois peut par contre jouer un rôle dans l'amortissement de l'onde stationnaire, donc dans l'intensité du son. A cet effet, un tube métallique est toujours plus lisse qu'un tube de bois même bien poli. Signalons que la flûte traversière Japonaise du théâtre Nô est entièrement laquée à l'intérieur.

Au niveau du biseau le matériau joue certainement un rôle important selon qu'il donne une arête tranchante, arrondie, striée comme nous l'avons signalé plus haut. Mais dans ce domaine l'expérimentation est rendue très difficile par les variations de timbre due au musicien, qui sont, nous allons le voir, déterminantes.

c) Variations de timbre dépendant du musicien.

Le musicien contrôle la forme du jet d'air par le moyen de la forme et de la section de la lumière ainsi que de l'état des bords de la lumière (muqueuses des lèvres). Il est maître de l'orientation du jet d'air. Nous comptons faire prochainement des expériences systématiques à ce sujet; un sondage nous a déjà convaincu de l'importance de ce point, le spectre change du tout au tout selon la direction que fait le jet d'air avec le biseau.

En jouant sur la couverture du trou d'embouchure on agit aussi sur la composition spectrale. Lorsque l'embouchure est très couverte on se rapproche d'un tuyau fermé à un bout, donc d'un spectre où les harmoniques impairs sont prédominants.

La forme du transitoire d'attaque des sons dépend en grande partie du flûtiste. Traditionnellement on attaque un son par un " coup de langue ". On accumule de l'air sous pression dans la bouche obturée par la pointe de la langue (fig.15); lorsqu'on retire celle-ci la sortie brusque d'air comprimé provoque une petite explosion qui lance l'onde stationnaire. Ce faisant on réalise un mouvement articulatoire proche de celui qui permet de prononcer la consonne T, d'où la dénomination. Pour le petit coup de langue " t " la langue s'arrête derrière les dents supérieures. Dans les mouvements très rapides la langue économise un mouvement en pratiquant une

...../

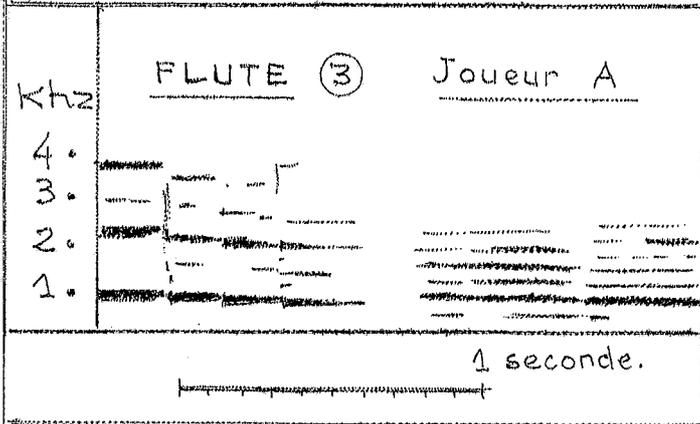
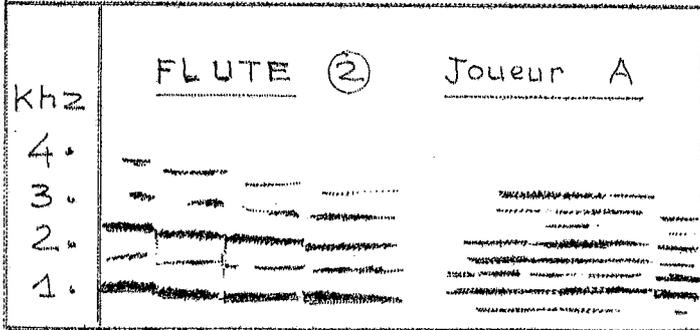
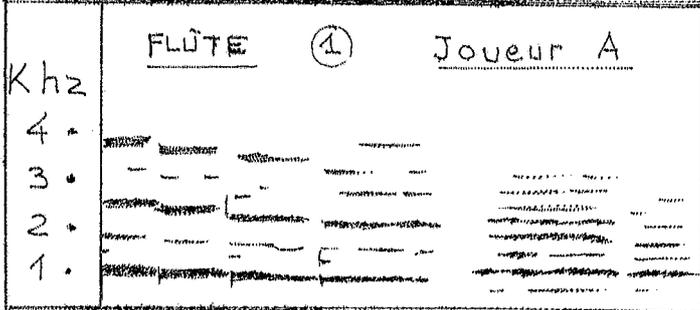
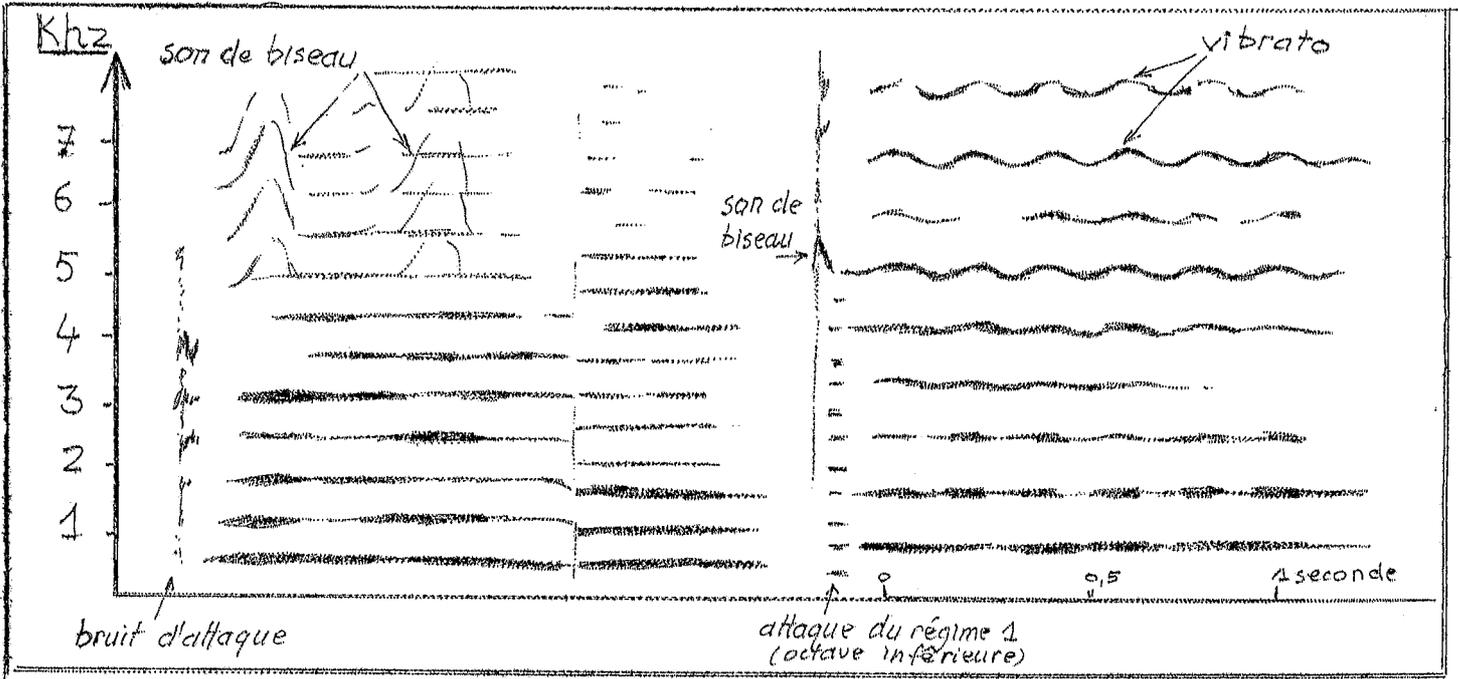
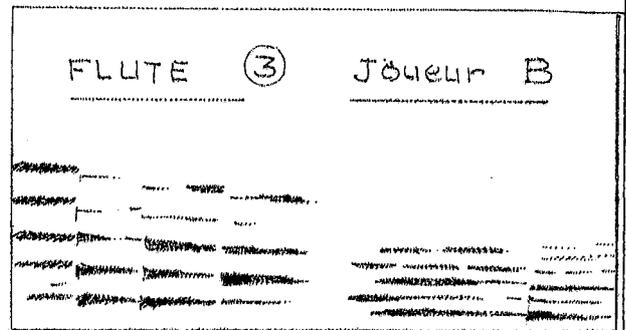


fig. 17



deuxième obturation sans son mouvement de retrait, sur la voûte du palais (prononciation approchée de K). A ces différentes articulations correspondent des formes acoustiques particulières : (fig.16) bruit plus important pour T et t, double explosion pour K, les composantes harmoniques apparaissant dans un ordre variable selon les notes. Tous ces phénomènes durent au minimum 40 à 50 ms. On observe souvent au moment du coup de langue une fréquence brève située entre 4000 et 8000 Hz; c'est le son de biseau. Il persiste quelquefois pendant l'émission du son normal, produisant un sifflement aigu que les flûtistes considèrent comme désagréable et cherchent à éliminer.

Le vibrato est un phénomène que l'on retrouve dans tous les instruments occidentaux ayant un champ de liberté de fréquences. Il est caractérisé par une modulation périodique de la fréquence le plus souvent associée à l'intensité, au rythme de 6 à 8 oscillations par seconde. Ce rythme est sans doute lié à des caractéristiques de la physiologie musculaire. La présence ou l'absence de vibrato modifie considérablement le timbre des sons bien que la répartition spectrale soit pratiquement la même. En fait le problème est d'ordre psycho-physiologique. La théorie de l'information justifiée, par la physiologie nerveuse nous ont appris qu'un son pour être intéressant doit changer constamment. Or les sons musicaux sont des " êtres vivants " fluctuants en particulier par le moyen du vibrato (Bib.8). La forme et l'ampleur du vibrato, et particulièrement le raccordement du vibrato dans le passage d'une note à une autre sont caractéristique d'un flûtiste donné.

#### 5 - Comparaisons de flûtes et de flûtistes.

Grâce à la collaboration de Mlle NOUFLARD nous avons fait l'expérience suivante (bibl.9). Nous lui avons demandé de jouer la même formule mélodique sur quatre flûtes différentes en lui laissant tout le temps de s'habituer à chaque instrument. L'analyse montre (fig.17) une grande similitude d'allure des spectres et des attaques.

Nous avons alors demandé à un autre flûtiste de jouer sur un des quatre instruments la même mélodie. Le résultat est totalement différent.

Ceci confirme les résultats précédents. Le musicien est maître de la plupart des paramètres qui conditionnent la forme du jet d'air, donc la forme de la vibration acoustique. Il peut introduire de grandes variations au cours de l'interprétation d'un morceau de musique; mais dans l'exécution d'une petite formule de 3 secondes il recherche généralement un timbre particulier, " agréable, riche, beau " qui se trouve être remarquablement constant pour un même individu, preuve que celui-ci maîtrise parfaitement les paramètres de l'excitation. Il est certain que les caractéristiques d'un timbre beau et agréable varient fortement d'un individu à l'autre, selon les

propriétés de l'oreille et le conditionnement artistique de chacun. Nous avons en tous cas les moyens actuellement d'en faire l'analyse au sonographe et d'entreprendre, comme pour les pianistes (Bib.10) une étude du style des flûtiste : vibrato, attaques, timbre, interprétation des durées etc...

o  
o o

## C - LA FLUTE ALTO ET LE PICCOLO

Tout ce que nous venons de dire concerne aussi les flûtes traversières d'autres tailles mai il convient d'ajouter quelques remarques qui leur sont particulières.

### a) La flûte alto ou flûte en sol

C'est une réplique agrandie de la flûte en ut.

Longueur du tube : 82 cm env.

Diamètre intérieur : 26 mm

Les trous sont plus grands (19 mm de diamètre) et nettement plus écartés que dans la flûte en ut. L'instrument est lourd à tenir, du fait de son poids et nécessite un grand débit aérien.

La tessiture de la flûte alto part du sol<sub>2</sub> = 198 Hz et couvre deux octaves facilement. Dans le grave et dans le médium le timbre est particulièrement beau et agréable; les analyses au sonographe montrent que l'intensité des harmoniques 1, 2 et 3 peut être très grande. Au delà les sons sortent mal et sont peu timbrés.

L'emploi de la flûte en sol dans l'orchestre reste très limité malgré les magnifiques exemples de RAVEL et STRAVINSKY

### b) Le piccolo

Cette petite flûte à l'octave aiguë de la flûte en ut est l'héritier direct de la " flûte des Suisses " de Praetorius et du " fifre " décrit par MERSENNE, lequel en donne la tablature.

Curieusement le piccolo a conservé beaucoup des traits des flûtes du 19<sup>e</sup> siècle. Il se fait le plus souvent en bois, de perce cônica.

La clefserie de BOHEM logée tant bien que mal dans un espace restreint pose au facteur des problèmes de minutie et de haute précision.

La tessiture du piccolo s'étend du RE<sub>4</sub> (588 Hz) au DO<sub>7</sub> (4180 Hz).

...../

Or on sait que le maximum de sensibilité de l'oreille se situe autour de 2000 Hz et qu'au-delà la sensibilité différentielle décroît vite. Les flûtistes savent que dans la troisième octave la justesse ne pose pas de problème.. On peut même jouer, dans un trait rapide un sib pour un si naturel, personne ne s'en aperçoit !

La tessiture du piccolo lui donne une place à part dans l'orchestre. Il donne du " brillant ", du " mordant " à la ligne mélodique qu'il double, et surtout il émerge toujours quel que soit le tutti d'orchestre. Comme pour le triangle ou le galoubet l'émergence du piccolo n'est pas un problème de rapport d'énergie mais de situation dans la zone de fréquence, de perception des formes.

IV - C O N C L U S I O N S

Un instrument de musique aussi simple d'aspect qu'une flûte (un tube percé de trous...) pose bien des problèmes acoustiques dont beaucoup sont encore loin d'être résolus. Dans ce domaine, seule l'expérience empirique des facteurs permet d'aboutir à un compromis valable entre l'acoustique, la psycho-physiologie et l'anatomie. L'évolution dûe en grande partie à BOEHM, n'a pu être faite que sur la base de nombreuses expériences empiriques et grâce à une bonne connaissance de la mécanique de cisterie.

Une question se pose aujourd'hui au facteur qui veut améliorer l'instrument : Qu'est-ce qu'une bonne flûte?

C'est d'abord une flûte la plus juste possible; il y a encore à faire, en particulier pour le do et le DO# , surtout que beaucoup de beaux instruments fabriqués pour un diapason trop bas à la fin du siècle dernier, ont été recoupés et sont devenus irrémédiablement faux (Bib.11). On sait que déplacer ou changer les dimensions d'un trou ne modifie pas qu'un seul son, mais affecte diversement plusieurs sons des trois octaves...

Pour un musicien donné, une bonne flûte est celle qui lui permet de jouer avec le moins d'effort possible le timbre qu'il estime agréable. Selon sa conformation anatomique (dents, mâchoires, forme des lèvres), le musicien dirigera l'air plus facilement dans une direction donnée, et telle pente intérieure de la cheminée lui permettra de produire les sons qu'il désire sans effort. La forme de la plaque d'embouchure intervient aussi dans l'adaptation du musicien à l'instrument. On voit que le problème est loin d'être simple; une " bonne " flûte devrait être faite sur mesure. Mais on ne peut " mesurer " la disposition des lèvres et des dents comme on mesure une largeur d'épaule, et dans la pratique, les facteurs soucieux de la qualité offrent au flûtiste un choix d'embouchures parmi lesquelles ils trouvent celle qui leur convient. L'idéal serait évidemment de normaliser les flûtistes .... Pour terminer nous ne pouvons résister au plaisir de citer un texte de J. QUANTZ (Versuch einer anweisung die Flute traversière zu spielen) qui se place tout à fait dans cette perspective !

" ... La flûte exige un corps parfaitement sain, une poitrine forte et ouverte, un souffle long, des dents égales qui ne soient ni trop longues ni trop courtes, des lèvres non pas proéminentes et épaisses, mais fines, lisses et minces, qui n'aient ni trop ni trop peu de chair et peuvent obturer la bouche sans difficulté, une langue déliée et habile, des doigts bien conformés, ni trop longs ni trop courts ni trop charnus et qui ne soient pas trop pointus, mais qui possèdent des nerfs solides, et un nez ouvert permettant à la fois d'inspirer et d'expirer facilement ".

## B I B L I O G R A P H I E

- 1 - BOUASSE - " Instruments à vent " T.I. et II  
Ed. Delagrave-Paris, 1929.
- 2 - BOUASSE - " Tuyaux et résonateurs "  
Ed. Delagrave - Paris, 1929
- 3 - Z. CARRIERE - " Phénomènes à l'embouchure d'un tuyau  
d'orgue "  
Journal de Physique et du Radium.  
T. VI - 1925 p. 52-64.
- 4 - BRUHAT - " Cours de Physique Générale " Mécanique.  
5ème Ed. complétée par FOCH  
Ed. Masson - Paris, 1955.
- 5 - TAFFANEL et FLEURY - " La flûte "  
In Encyclopédie de la Musique de LAVIGNAC  
Technique instrumentale, p. 1483
- 6 - Th. BOEHM - Die Flöte und das Flötenspiel "  
Munich 1871.  
Traduction Américaine de D.C.MILLER  
Cover Publ. New York, 1964.
- 7 - E. LEIPP - " Les champs de liberté des instruments de  
musique ".  
Bulletin du G.A.M. N° 10  
Publication interne Faculté des Sciences  
Fév. 1965.
- 8 - M. CASTELLENGO - " Rôle du musicien dans les signaux  
rayonnés par la flûte traversière ".  
C.R. Congrès Int. Acoust. (ICA), Tokyo, 1968
- 9 - M. CASTELLENGO - " Instruments de musique traditionnels,  
instruments de musique électroniques ".  
Conférence des journées d'Etudes  
Chiron 1967.
- 10 - M. CASTELLENGO - " Peut-on apprécier objectivement le  
style des pianistes ? "  
Bulletin du G.A.M. N° 30 b  
Publication int. Faculté des Sciences,  
Mai 1967.
- 11 - E. LEIPP - M. CASTELLENGO - " Le diapason "  
Bulletin du G.A.M. N° 36  
Publication int. Faculté des Sciences,  
Mai 1968.

## ENTRETIEN AVEC Mr. LEFEVRE ET DISCUSSION

### RESUME PAR E. LEIPP

M. LIEPP Nous avons la chance d'avoir parmi nous Martial LEFEVRE qui fut longtemps contre-maître chez LOT dont chacun sait qu'il fabriquait des flûtes de réputation internationale; actuellement M. LEFEVRE fait les flûtes BUFFET CRAMPON et nous avons pu lui rendre visite à plusieurs reprises. Ceci nous a permis de nous documenter à la source de ce que représente la fabrication d'une flûte d'art. La simplicité apparente de l'instrument ne doit pas nous leurrer sur les difficultés de sa réalisation, en particulier si l'on veut concilier le fonctionnel et le beau. Il en est ainsi très généralement de tous les métiers de "lutherie d'art" où la simplicité des moyens techniques est compensée par l'esprit inventif et l'extraordinaire habileté des facteurs.

M. LEFEVRE, vous perpétuez depuis 40 ans une tradition dont l'efficacité nous apparait à travers nos recherches, qui justifient totalement votre technique; les lois de la physique, de la métallurgie, de l'acoustique sont implicitement contenues dans vos réalisations; ces lois sont très compliquées et pourtant vous les maîtrisez avec un outillage très limité...

M. LEFEVRE Oui! Vous avez vu vous-même! Quelques pinces, quelques limes, un touret à percer de la soudure, un banc d'étirage, un petit établi. Mais je dois signaler que ces outils nous les faisons nous même le plus souvent, car il s'agit d'un usage très particulier.

M. LIEPP Et la matière première, les tuyaux... Vous achetez pour commencer du tube cylindrique?

M. LEFEVRE Plus exactement je le fais fabriquer spécialement, car il s'agit de tubes en argent ou maillechort qu'on ne trouve pas dans le commerce.

M. LIEPP En fabrication des saxophones, nous avons vu qu'on faisait les trous latéraux d'une façon particulière: on préperce un trou plus petit et on tire à travers lui un outil cône de plus grand diamètre; ainsi on obtient d'un seul coup la "cheminée" qui va être recouverte par le tampon.

M. LEFEVRE Nous ne pouvons guère faire ainsi, car l'expérience m'a montré qu'il fallait des arêtes vives à la base des cheminées; de plus on produit ainsi des contraintes qui déforment le tube. En fait, j'ajuste une petite cheminée que je soude à l'étain et non à l'argent, car cela recuirait le tuyau localement; le tube serait alors <sup>molli</sup> à ce point et il faut que les "patins" soient bien ajustés sur une surface dure.

.../

M. LEIPP Les cheminées sont donc soudées avant que le tuyau ne soit percé; comment percez-vous finalement?

M. LEFEVRE Je perce d'abord à la fraise un trou plus petit. On pourrait bien percer directement le trou voulu, mais j'ai fini par remarquer qu'alors la cheminée se "décolle" parfois un peu et je sais que la moindre fuite abîme tout du point de vue vue sonore.

M. LEIPP Le mécanisme actuel ne ressemble plus à l'ancien; pourquoi l'a-t-on changé?

M. LEFEVRE L'idée géniale de BOEHM a été la commande à distance par tringle, ce qui rend les clefs moins fragiles.

M. LEIPP C'est la même idée qui a présidé à l'invention du rouleau en orgue! Mais revenons à la flûte!

Le tuyau est prêt, les patins fixés à leur place; il faut à présent faire les clefs. J'ai été assez étonné de vous voir faire.... Voulez-vous nous en donner une idée?

M. LEFEVRE Je prends du fil de 6,5mm que je cambre d'abord en le pinçant dans l'étau; puis tout le reste se fait à l'aide d'un marteau et de l'enclume: je frappe ici et là pour donner la forme, je ramène du métal au point voulu etc.

M. LEIPP Pourquoi ne faites-vous pas couler ou mouler sous pression : on fait aussi de belles choses.

M. LEFEVRE Je sais, et les instruments industriels sont faits ainsi; mais l'expérience montre que la structure du métal martelé est très différente; la pièce forgée est beaucoup plus dure et on peut ainsi faire des clefs beaucoup plus fines, donc plus jolies à voir, et plus résistantes à la déformation et à l'usure aux points d'articulation.

M. LEIPP Etes-vous nombreux à procéder ainsi ?

M. LEFEVRE Je suis seul en France, et à l'étranger je ne connais plus personne à forger les clefs comme je le fais.

M. LEIPP Nous en sommes maintenant aux plateaux porte-tampons

M. LEFEVRE Ils sont estampés; leur montage est ce qu'il y a de plus délicat. Le tamponnage doit être parfait. Sous le tampon on met un peu de cire; on réchauffe le tout, et alors le tampon se place de lui même au mieux.

M. LEIPP Cet auto-ajustage est très astucieux. Voici donc le corps te-r-miné. Si j'ai bien compris c'est maintenant que commencent vos ennuis, avec la tête!

M. LEFEVRE Oui! Il y a 40 ans que je cherche la meilleure formule: je ne l'ai pas encore trouvée.

.../

M. LEIPP. Si l'homme était un être normalisé, ce serait fait depuis longtemps. Mais voilà!

La première difficulté matérielle vient de ce que la tête est cônica; comment procédez-vous?

M. LEFEVRE. Je prends encore du tuyau de 19 mm de diamètre et je le forme sur un mandrin en rétreignant le métal à l'aide d'une rondelle de plomb qui plaque le métal sur le mandrin qui est cônica.

M. LEIPP. J'ai entendu raconter toutes sortes de choses sur ce mandrin, qui serait un grand secret!

M. LEFEVRE. N'exagérons rien! Tout le monde peut relever les cotes d'une flûte LOT et refaire un mandrin en acier; mais le problème n'est pas là. Quoiqu'on fasse, le métal rétreint n'épouse jamais exactement la forme du mandrin; le mandrin travaille et quand on contrôle les diamètres après l'opération, on voit bien qu'il faut faire des retouches! En fait, il ne s'agit pas d'un vrai cône mais d'une forme en bouteille de Saint Galmier; je retouche avec une pince spéciale, à la main, et ce n'est pas facile!

M. LEIPP. Oui; ce genre de tour de main existait dans tous les métiers de la lutherie; il demande des années de pratique et la main y réalise des opérations très compliquées, car c'est un outil sensitif... Il ne faut pas se faire d'illusions sur la possibilité de copier ce tour de main; l'artisan n'a même pas besoin de se cacher et de faire des secrets, car on ne l'imite pas si facilement: c'est comme en prestidigitation.

Comment contrôlez-vous le diamètre intérieur? car on ne peut prendre le diamètre extérieur, le métal en se rétreignant doit s'épaissir par endroits...

M. LEFEVRE. Le métal gonfle en effet et le tube s'allonge: de près de 2 cm... Le contrôle l'intérieur avec des rondelles fixées sur une tringle que j'enfonce jusqu'à butée; je sais alors que le tube, à ce point, a le diamètre voulu; une règle spécialement graduée me permet rapidement de contrôler l'ensemble.

M. LEIPP. Puis vient le trou d'embouchure... c'est sans doute là le hic car, selon les résultats obtenus par Melle CASTELLENGO, c'est la loi d'écoulement de l'air ici qui détermine toute l'excitation; or elle dépend de l'état de l'arête, des dimensions du trou, de la forme des bords, etc.

M. LEFEVRE. J'ai vérifié que chaque musicien, selon la conformation de ses mâchoires, de ses dents, de ses lèvres, demandait une embouchure correspondant à sa bouche.

Melle CASTELLENGO. Dans ce cas, une seule solution semble valable: comme on peut faire pratiquement du "sur mesure", il suffit de donner plusieurs embouchures à choisir et chacun prend selon son anatomie et ses habitudes.

M. LEFEVRE. C'est ce que je fais; parfois je me suis amusé: un virtuose international prend telle embouchure et en rejette une comme affreuse, le lendemain un autre trouve cette dernière magnifique...

M. LEIPP. Bref, il n'y a pas "bon" ou "mauvais" , mais adapté ou non.

Melle CASTELLENGO. Je suis à peu près sûre que le matériau intervient à l'échelle microscopique sous l'aspect de l'état de l'arête, qui change nécessairement avec le matériau; il reste beaucoup à faire pour préciser ce point.

M. LEIPP. Argentez-vous vous-même ?

M. LEFEVRE. Non, je donne tout à un spécialiste. Mais tout est ensuite repoli, bruni, poli encore, y compris l'intérieur qui doit être comme un miroir.

Melle CASTELLENGO. Je pense que ce détail est important; il joue sans doute dans l'amortissement de l'onde stationnaire; on nous a dit la même chose pour tous les instruments à tuyau...

M. LEFEVRE. On polissait d'ailleurs autant les flûtes en bois..

M. CUILLEBIER. Melle Castellengo, avez-vous fait des sonagrammes comparatifs entre flûtes en bois et en métal?

Melle CASTELLENGO. C'est très difficile; d'abord personne ne sait plus très bien jouer de la flûte en bois et on peut difficilement tirer des conclusions à partir de disques, sauf pour le style de jeu. Ensuite, il faudrait comparer deux instruments strictement identiques en bois et en métal, ce qui est impossible; si on change plusieurs variables, on ne peut plus rien conclure.

J'ai eu la chance de trouver une tête en bois de flûte BOEHM qui s'ajustait exactement sur ma flûte métal: le timbre est différent; mais ni la forme intérieure du tuyau, ni celle du trou ne sont identiques, ni non plus l'état de l'arête. On ne peut donc rien conclure; on a surtout raconté beaucoup d'histoires, comme dans tous les cas où de nombreux paramètres interfèrent. De toutes façons, une expérimentation systématique est relativement facile avec des tuyaux d'orgue où l'on peut normaliser le débit et la forme de la lame d'air ainsi que sa direction, c'est bien difficile ici. Si on met une soufflerie automatique avec un ajustage, on réussit bien à faire parler la flûte mais cela n'a plus rien à voir avec le jeu normal où ce sont justement les modulations de la lame d'air en fonction de l'arête qui déterminent le phénomène: en somme, on étudie autre chose!

Mme BOREL-MAISONNY. En quel bois faisait-on naguère les flûtes?

M. LEFEVRE. En ébène ou grenadille, aussi en buis, un bois qui avait bien des qualités. Mais tout cela se fendait constamment et avec le métal on n'a au moins plus ce genre d'ennuis.

M. LEIPP. Je signale encore que Martial Lefevre est flûtiste, c'est un point qui ne semble important: il sait à quoi ce qu'il fait correspond musicalement et tous les facteurs hors série ont été musiciens eux-mêmes!

M. SIESTRUNCK. Nous remercions Martiel LEFEVRE de nous avoir apporté toutes ces intéressantes précisions sur l'art de faire une flûte, mais aussi M. HERICHE et Mademoiselle NOUFFLARD qui nous ont montré tout ce qu'on pouvait tirer de ce merveilleux instrument... lorsqu'on sait s'en servir !