

ÉTUDE DU DÉPLACEMENT CONTINU D'UN TROU LATÉRAL DANS UN  
TUYAU À EMBOUCHURE DE FLÛTE

M. CASTELLENGO—Y. NAGAI, *Laboratoire d'Acoustique, Fac. des Sciences, Paris, France*

I. INTRODUCTION

Dans la construction d'un instrument à vent à trous latéraux, la détermination de l'emplacement optimum d'un trou doit tenir compte de plusieurs facteurs : la justesse, l'émission aisée du son, la qualité du timbre et le rapport de justesse entre les différents partiels, ce qui conditionne la possibilité d'octavier ou de quintoyer sans changer de doigté.

Les expériences antérieures sur l'étude des trous latéraux dans un tuyau à embouchure de flûte sont peu nombreuses. LAMBERT(1), BOUASSE(2) ne donnent des résultats que pour des emplacements déterminés de trous et ne concernent pratiquement que le fondamental du tuyau. MULLÉ(3) excite le tuyau à l'aide d'un haut-parleur, conditions éloignées de la réalité musicale.

Il nous a paru intéressant de réaliser une série d'expériences en nous plaçant dans les conditions réelles de jeu et en cherchant à connaître l'allure des phénomènes.

II. DESCRIPTION DES EXPÉRIENCES

1) Excitation du tuyau par le jet. Ces expériences s'inscrivant dans une recherche sur la flûte traversière, nous avons utilisé un dispositif d'excitation simulant le jeu du musicien, dans lequel, les dimensions de l'ajutage, la direction, la hauteur, et la distance du jet à l'embouchure sont réglables. Pour obtenir un trou déplaçable à volonté, nous avons utilisé deux tubes d'acier de faible épaisseur (0,5 mm) coulissant parfaitement l'un dans l'autre. Sur le tube intérieur, on pratique dans le sens de la longueur, une fente de 5 mm de large. Le tube extérieur est découpé en rondelles de 1 à 10 mm de largeur. En ménageant des intervalles entre ces rondelles, on peut donc disposer des trous aux endroits voulus et leur donner des dimensions quelconques. La longueur acoustique du tube est de 583 mm ; le diamètre intérieur, de 18 mm. L'embouchure est tout à fait conforme à celle d'une flûte traversière classique.

Il est à noter qu'on ne peut faire avec ce système que des trous rectangulaires. Des expériences comparatives avec des trous ronds et rectangulaires de mêmes sections nous ont permis de conclure à des résultats identiques, du moins en ce qui concerne la fréquence, et à condition de repérer le trou par son milieu.

Après avoir réglé le système d'excitation pour obtenir des sons intenses pour les cinq premiers partiels, on bloque les réglages, les conditions d'excitation ne devant pas varier dans cette expérience. Puis, en faisant croître régulièrement la pression on relève toutes les fréquences émises par la flûte, c'est à dire le champ de liberté en fréquences de chaque partiel. (4). On procède de même pour les diverses positions du trou.

Dans la figure 1 on peut voir l'évolution de la fréquence des partiels en fonction de la pression lorsqu'un trou de 5/5 mm glisse continuellement sur la génératrice du cylindre, depuis l'extrémité ouverte jusqu'aux 3/4 environ du tuyau. En ordonnée on porte la distance en cm (y) du trou à l'extrémité ouverte du tuyau.

Les traits renforcés correspondent à la limite supérieure du champ de liberté en fréquence; au delà de cette limite on s'ute au partiel supérieur. Dans le jeu normal, le musicien se tient

# SEVENTH INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, BUDAPEST 1971

ETUDE DU DEPLACEMENT CONTINU D'UN TROU LATÉRAL DANS UN TUYAU A EMBOUCHURE DE FLUTE

2

très près de cette limite car il considère que le son y est musicalement "bon".

On constate, fig. 1a, des sauts de fréquence assez importants, d'autant plus nombreux que le partiel est de rang élevé. Prenons par exemple le partiel 2. Partie de 530 Hz lorsqu'il n'y a pas de trou, sa fréquence croît régulièrement au fur et à mesure que le trou se rapproche de l'embouchure, atteint 660 Hz lorsque le trou se trouve à 16 cm de l'extrémité (soit au 1/4 du tuyau), et là, saute brusquement à 785 Hz pour croître à nouveau régulièrement, et subir encore un saut quand le trou est au milieu du tuyau.

Nous pouvons dès maintenant en tirer des conclusions quant à la justesse des partiels, en comparant leurs fréquences à celles des harmoniques correspondants du partiel 1. Ainsi, le partiel 2 n'est vraiment à l'octave du premier que lorsque le trou reste en deçà du premier quart du tuyau ; au delà, l'octave est beaucoup trop grande. Dans la réalité le musicien peut toujours jouer sur le champ de liberté en modifiant l'excitation, mais c'est au détriment du timbre.

Pour connaître l'incidence du diamètre des trous sur l'allure de ces courbes nous avons refait la même expérience, avec un trou très petit (5/2mm) puis très grand (5/30mm) ; Figures 1b, 1c. Les résultats confirment la pratique des facteurs ; il est souhaitable de faire les trous latéraux les plus grands possibles, d'autant que la richesse du timbre est liée à la justesse des partiels.

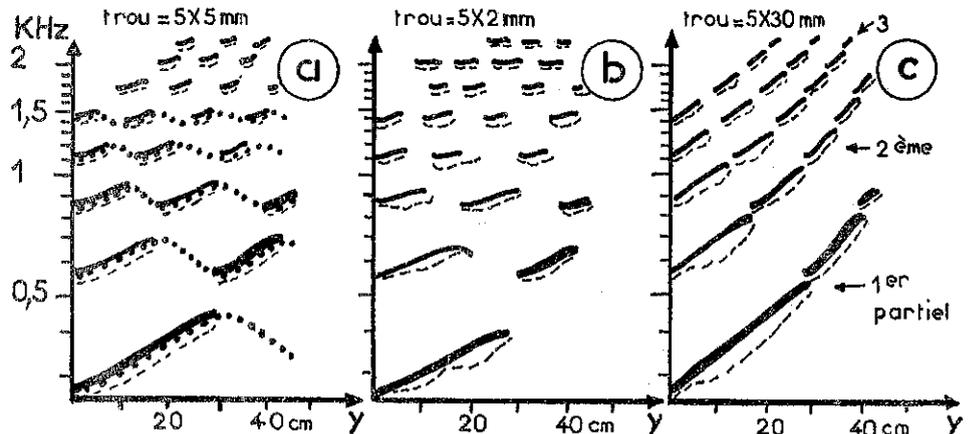


Fig. 1 ——— Courbes d'évolution en fréquence des cinq premiers partiels  
 - - - - - Champ de liberté en fréquence de chaque partiel  
 . . . . . Fréquences de résonance obtenues quand le tuyau est excité par haut-parleur.

2) Excitation par haut-parleur ; Il était intéressant de comparer ces résultats avec ceux que l'on obtient en excitant le tuyau avec un haut-parleur. Cette expérience classique a été réalisée en disposant un haut-parleur en face de l'embouchure et en relevant les fréquences de résonance à l'aide d'un microphone 1/4 de pouce muni d'une sonde permettant de pénétrer dans le tuyau. On a mesuré la fréquence à l'aide d'un compteur électronique ; Les courbes des divers modes de résonance sont portées sur la figure 1a, en pointillé. On constate immédiatement que certaines parties de ces courbes disparaissent lorsqu'on excite le tuyau avec un jet aérien. Pour expliquer ce phénomène, M. MAGAI a utilisé la théorie des analogies électriques.

# SEVENTH INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, BUDAPEST 1971

ETUDE DU DEPLACEMENT LATERAL D'UN TROU DANS UN TUYAU A EMBOUCHURE DE FLUTE

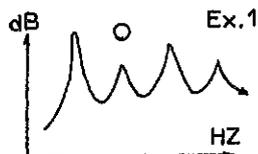
3

## III. ESSAI D'EXPLICATION THEORIQUE

La réponse passive peut s'expliquer par la théorie de la ligne de transmission (7) et (8). En utilisant l'impédance totale du système vue du haut-parleur,  $Z_{en} = R_{en} + jX_{en}$ , on peut obtenir l'énergie transmise au tuyau.

$$|p| \cdot |u| \cos.\arg(p.u) = p \cdot \frac{R_{en}}{R_{en}^2 + X_{en}^2}$$

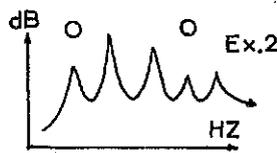
car la pression  $p$  est constante dans l'excitation par haut-parleur. ( $u$  est la vitesse moléculaire. On peut donc constater que la réponse correspond à la partie réelle de l'admittance vue du générateur sinusoïdal placé à l'embouchure.



On voit deux exemples des courbes de réponse dans la fig. 2 où nous ne montrons que des résultats de calcul, étant donné que nous avons eu de bonnes concordances avec les résultats expérimentaux. Les résonances marquées O dans la figure se révèlent improductibles lorsqu'on excite le tuyau avec le jet d'air.

Introduisons l'impédance du jet :  $Z_{jet} = R_{jet} + jX_{jet}$

Pour amorcer et maintenir la résonance par le jet, il est nécessaire que  $R_{jet}$  soit négative et que son module soit plus grand que la somme de  $R_{en}$  et de la valeur résistante provenant de la perte, de sorte que la résistance totale de ce système soit négative.



Suivant des mesures faites par Coltman (5)  $|R_{jet}|$ , lors du jeu, augmente de façon monotone avec la pression à l'embouchure. D'autre part, selon Bouasse (6) nous savons que la période du vortex, produit par le jet rencontrant le biseau, diminue avec la pression, d'où on comprend bien que le flûtiste peut faire croître la fréquence des sons quand il augmente la pression. En tenant compte de ces deux idées, nous observons maintenant le changement

Fig. 2

détaillé de l'impédance passive à l'embouchure, en fonction de la fréquence, dans le plan ( $R_{en}, X_{en}$ ), pour différentes positions du trou.

En général, nous obtenons les courbes spirales comme celle de la Figure 3. Les parties internes de la spirale correspondent aux hautes fréquences. Nous ne montrons dans les figures suivantes 4a, b, c, et d, que la partie proche de l'origine, car les résonances ne se produisent effectivement que lorsque  $X_{en}$  prend la valeur zéro, et pour les plus faibles valeurs de  $R_{en}$ .

La figure 4a montre un exemple dont toutes les résonances passives peuvent être produites par l'excitation du jet, car les valeurs de  $R_{en}$  en résonance augmentent régulièrement. Dans la figure 4b, (où le trou est à 12cm de l'extrémité ouverte), la valeur de  $R_{en}$  pour la 4ème résonance passive est plus grande que celle de la 5ème, de sorte que l'on ne pourra pas produire la 4ème résonance par le jet, car  $R_{jet}$  est obligé de prendre la valeur de la 5ème résonance après la 3ème. De la même façon on peut constater que les 2ème et 5ème résonances (en pointillé sur la figure) sont improductibles quand le trou est à 20 cm de l'extrémité ouverte; fig. 4c, ainsi que les 1ère, 3ème, 5ème, et 7ème résonances dans la figure 4d ( $y = -32cm$ ).

Ainsi, par l'étude de la courbe de l'impédance passive dans le plan ( $R_{en}, X_{en}$ ) on peut savoir quelles résonances passives pourraient correspondre aux sons que l'on peut produire effectivement par le jet d'air.

## IV - APPLICATION

A partir de ces explications on peut comprendre pourquoi le joueur d'un instrument de musique à vent n'obtient pas les premières résonances passives lorsqu'il utilise la clé d'octave ou de douzième. On peut expliquer aussi les sauts de régime dans le registre aigu des instruments.

# SEVENTH INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, BUDAPEST 1971

ETUDE DU DEPLACEMENT CONTINU D'UN TROU LATÉRAL DANS UN TUYAU A EMBOUCHURE DE FLUTE

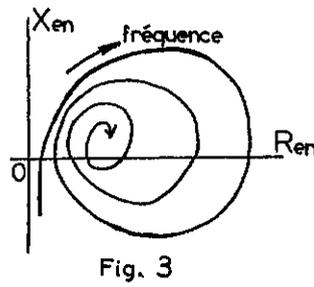


Fig. 3

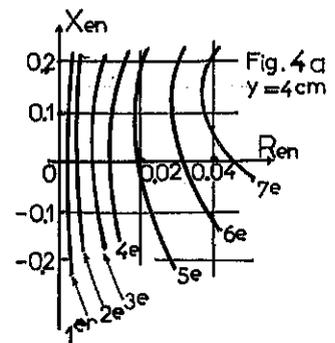


Fig. 4 a  
y=4cm

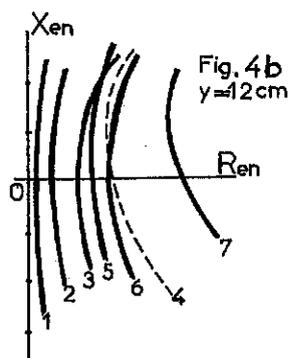


Fig. 4 b  
y=12cm

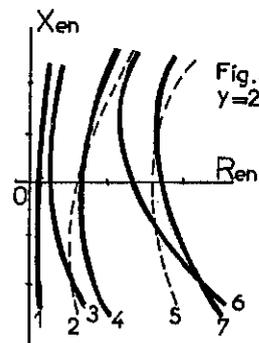


Fig. 4 c  
y=20cm

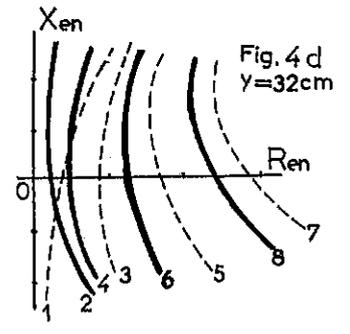


Fig. 4 d  
y=32cm

### BIBLIOGRAPHIE

1. LAMBERT - "Observations sur les flûtes" -Berlin 1775
2. BOUASSE - "Instruments à vent" -T.II.1930 - Delagrave Ed. Paris
3. MÜLLER J. - "Untersuchungen über die Resonanz eigenschaften der Blockflöte" - Dissert.P.T.B. Braunschweig - 1966
4. CASTELLENGO R. - "Le problème de la justesse des flûtes" Ctes Rend. 4ème Conf. Acoustique Budapest - 1967
5. COLTMAN - "Sounding mechanism of the flute and organ pipe".in J.A.S.A. 1969 p.983-992
6. BOUASSE - "Tourbillons, forces acoustiques" - Delagrave Paris - 1939 - p. 396
7. NEDERVEEN - "Acoustical aspects of wind instruments" - Amsterdam, Frits Knif éd. 1969
8. NAGAI, KATOH, MURAKAMI - Congress Text of Jap. Acoust. Society - May 1968