

M C A S T E L L E N G O

P A R A M E T R E S S E N S I B L E S
D ' U N T U Y A U D ' O R G U E A
E M B O U C H U R E D E F L Ū T E

J U I N 1 9 6 9

N ° 4 2

G A M

B U L L E T I N D U G R O U P E d ' A C O U S T I Q U E M U S I C A L E
F A C U L T É D E S S C I E N C E S - 8 R U E C U V I E R - P A R I S 5

Paris, le 1er Septembre 1969

G. A. M.
Groupe d'Acoustique Musicale
Faculté des Sciences
8 Rue Cuvier - PARIS 5°

BULLETIN N° 42

Adresse postale :
9 Quai St-Bernard PARIS 5°

REUNION DU 27 JUIN 1969

M. L. GAUTHIER, Vice Doyen de la Faculté des Sciences nous avait honoré de sa présence.

Etaient présents :

M. le Professeur SIESTRUNCK, Président.
M. LEIPP, Secrétaire Général, Mlle CASTELLENGO, Secrétaire;

Puis par ordre d'arrivée :

M. J.S. LIENARD (Ing. Arts et Métiers); M. GUILRAUD; M. GENET VARCIN (Chef de travaux chimie); M. BATT (assistant Fac. Sciences); M. J.L. VAL (Fac. Sciences Paris); M. J. LEGUY (Etudiant Télécomm.); M. JOUHANNEAU (CNRS); Mme CHARNASSE (CNRS); M. Georges LHOTE (Facteur d'orgues Genève); M. HARDOUIN (organiste); M. LEGROS; M. AUBANEL (Compositeur); M. CHORLAY (ORTF); Mme NIEKY (Phonothèque Nationale); M. BOISSEAU (organier); Mlle GRANGER (Phonothèque); M. TEXTIER et Melle GAUCHE (Direction de l'Architecture, Commission des Orgues); M. SELMER (Fabricant d'Instruments); M. Dominique CHAILLEY; M. TRAN VAN KHE (Maître recherche CNRS); M., Mme et Jean-François CLEAVER; M. FRANCOIS (Labo Acoustique EDF); M. ISOIR (organiste); Mme de CHAMBURE (Conservatrice du Musée Instrumental, Conservatoire de Musique de Paris); M. BASTISIER(SIERE); M. Claude ARMAND; M. A. TAMBA (Compositeur CNRS) Melle Sylvie HUE (Prof. de musique); Mme Odile BAILLEUX et M. DUPERRON (organiste); M. PICARD (Prof. de musique); Mme DUSSOUR; M. RUDRAUF (Prof. de musique); Dr PERROT et Marc PERROT; Dr POUBLAN (médecin biologiste); M. Serge OUNA (Rédacteur); M. MERCIER (Ingénieur); M. SURUGUES (Ethnomusicologue); Mme FULIN (CNRS); M. LELEUX (Ing. au CETIM); M. DELOSME (CNRS); Melle G. NOUFFLARD (flûtiste); M. GARDERET (Ing. Centrale); M. J.J. BERNARD (Maître de Conférence Fac. Sc. CAEN); M. CONDAMINES (Labo. acoustique ORTF). M. HARTMANN (organier);

Excusés : M. J. CHAILLEY; M. MERON; M. VALLET; M. GILOTEAUX; M. VALLANCIEN; M. JUNCK; Mme et M. GALMICHE; M. HOST; M. BUSNEL; M. BLADIER; M. HUGONNET; M. JAMET; Mme SOLA; M. AROM; M. CHIARUCCI; Melle MEGEVAND; M. P. DAUVILLEZ; M. COSTERE; M. PERIN; M. MAILLARD; M. MOLES; M. MAILLOT; M. BLONDELET; M. MEYER-SIAT.

Périodique : 6 numéros annuels

Prix de vente : service gratuit

Imprimeur : Labo. Mécanique Physique; Fac. des Sciences de Paris

Nom du Directeur : M. le Professeur SIESTRUNCK;

N° d'inscription Commission Paritaire : 46 283.

PARAMETRES SENSIBLES D'UN TUYAU D'ORGUE A EMBOUCHURE DE FLUTE

P L A N

I - GENERALITES

II - RAPPEL DU FONCTIONNEMENT D'UN TUYAU A EMBOUCHURE DE FLUTE

- 1) Le tuyau ou corps sonore
- 2) L'excitateur ou système lame d'air-biseau
- 3) Le tuyau à embouchure de flûte

III - METHODES ET APPAREILLAGES

- 1) Schéma de l'installation des expériences
- 2) Méthode du sonographe.

IV - PARAMETRES LIES A LA COLONNE D'AIR

- 1) Passage du tuyau ouvert au tuyau fermé
- 2) Rôle de la taille
- 3) Conséquences
- 4) Cas des tuyaux à cheminée
- 5) Tuyaux coniques

V - PARAMETRES LIES AU SYSTEME EXCITATEUR

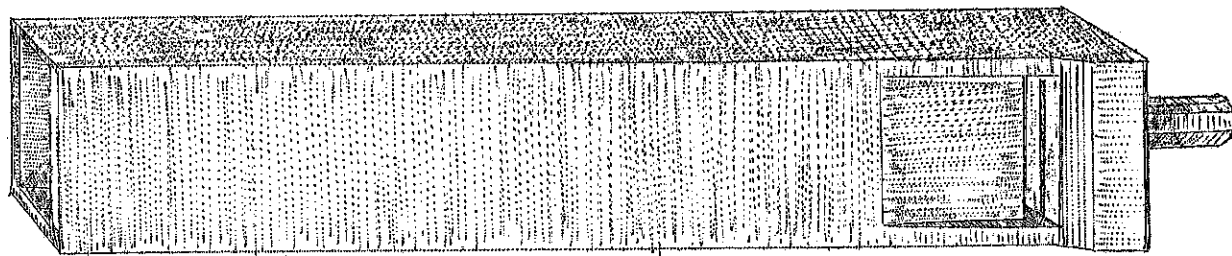
- 1) Description
- 2) Le son de biseau ou son de bouche
- 3) Rôle du son de bouche dans l'attaque du tuyau
- 4) Réglage de la pression
- 5) Rôle du pied
- 6) Forme de la lumière
- 7) Orientation de la lèvre supérieure
- 8) Orientation du fond
- 9) Rôle de l'égueulement
- 10) Rôle de quelques accessoires de la bouche : les oreilles
le rouleau

VI - ROLE DU MATERIAU

- 1) La vibration des parois
- 2) L'état de surface du matériau

VII - CONCLUSION

COMPTE-RENDU DE LA DISCUSSION



TUYAU de bois

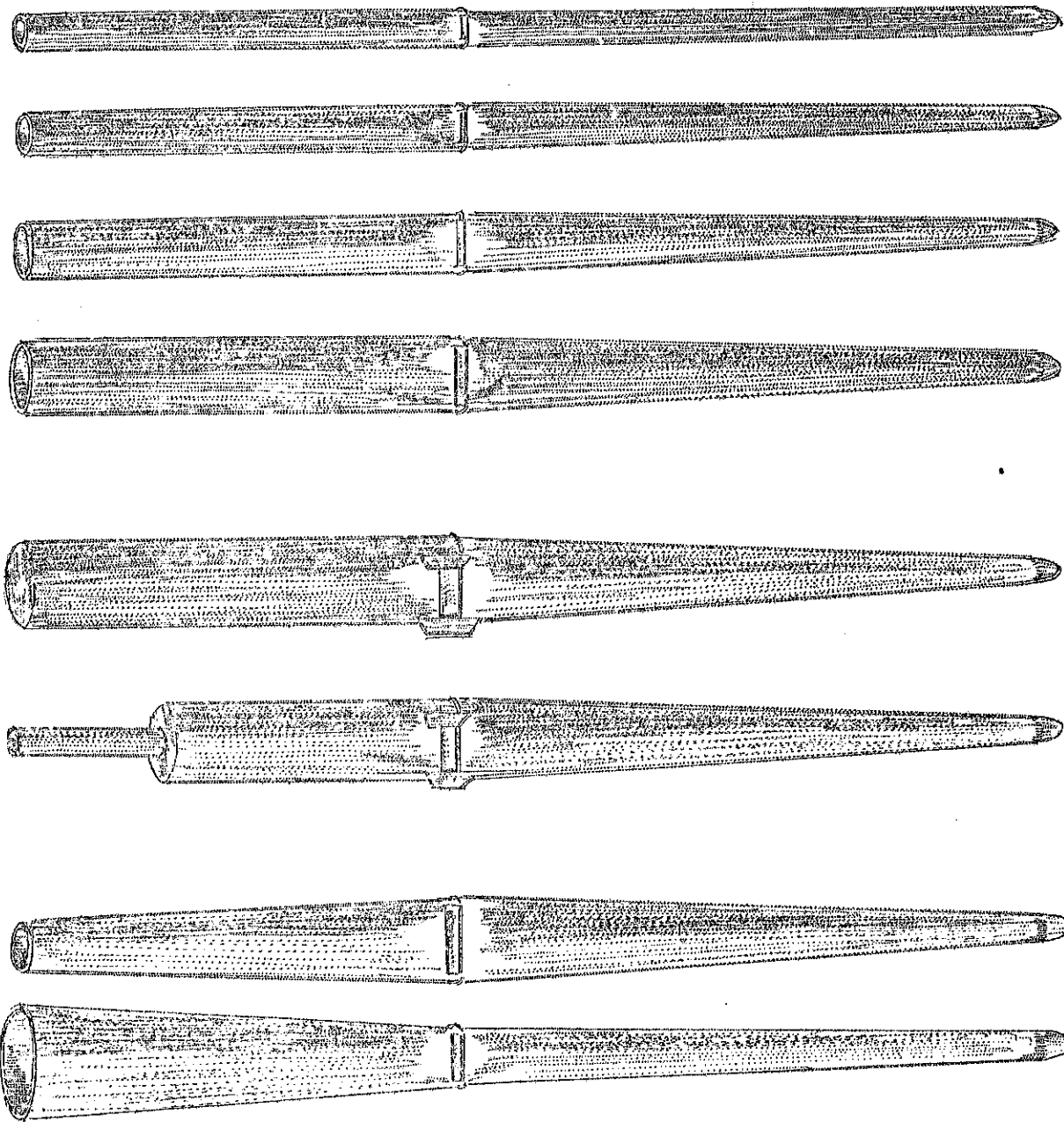
TUYAU CÔNIQUE

FLÛTE A FUSEAU

BOURDON A CHEMINÉE
(tuyaux munis d'oreilles)

BOURDON

TUYAUX DE TAILLES DIVERSES
Grosse taille (nasard, flûte, cornet)
moyenne taille (prestant)
menue taille (fourmiture, symboles)
très menue taille (basse de viole)



I - GENERALITES

L'étude expérimentale des tuyaux à embouchure de flûte présente des difficultés presque insurmontables dans tous les cas où le musicien règle largement le phénomène acoustique. Nous l'avons vérifié en particulier pour le cas de la flûte traversière (Bib. 1). Ces difficultés sont par contre éliminées pour le tuyau d'orgue. Ici, le musicien ne peut guère agir que sur les transitoires, encore faut-il qu'il s'agisse d'orgues mécaniques où le toucher est susceptible de moduler dans une certaine mesure, les attaques et les extinctions du son. Il n'est donc pas étonnant que la plupart des chercheurs se soient plutôt intéressés au tuyau d'orgue sujet sur lequel on dispose de nombreuses publications. Ce sont par exemple celles d'HELMHOLTZ de BOUASSE, et plus récemment de LOTTERMOSER, J. MEYER, CREMER, MERCER etc... (Bib 2, 3, 4, 5, 6). La plupart de ces recherches portent sur la partie stable du son du tuyau, que jusqu'à ces dernières années, les appareils d'analyse permettaient seule d'étudier. Mais l'expérience des harmonistes montre que cette partie stable est relativement peu importante comparativement aux transitoires; le spécialiste sait bien que ce qui fait la qualité du son, c'est l'attaque qui peut être précise, tardive, bruyante, octaviante. Bref, c'est l'évolution temporelle du son qui importe du point de vue perceptif et, heureusement, l'électroacoustique nous a fourni récemment des moyens d'investigation adéquats de ce point de vue, en particulier le sonographe grâce auquel nous avons pu reprendre la question sous un jour nouveau, avec des résultats qui se raccordent bien avec la pratique empirique des facteurs d'orgue, qui reste actuellement la seule base sérieuse et dont il faut bien tenir compte.

Nous allons examiner ici successivement les principaux paramètres qui conditionnent le son d'un tuyau à bouche. S'il est aisé de les isoler en théorie, nous verrons comment le problème se complique dans la pratique où la modification d'une des parties du tuyau agit simultanément sur plusieurs paramètres de façon complexe.

Tout d'abord, il est nécessaire de rappeler quelques notions fondamentales sur le fonctionnement d'un tuyau à embouchure de flûte.

II - RAPPEL DU FONCTIONNEMENT D'UN TUYAU A EMBOUCHURE DE FLUTE

Comme c'est le cas pour tout instrument de musique, le tuyau d'orgue associe un excitateur à un "corps sonore" improprement appelé résonateur. L'excitateur lance le mouvement vibratoire et contribue à son entretien en apportant de l'énergie : le résonateur impose plus ou moins sa fréquence propre au système et réagit sur la forme du mouvement vibratoire, donc sur le timbre. Reprenons en détail chacune de ces parties.

1°) Le tuyau ou corps sonore

Un tuyau sonore peut toujours fonctionner selon plusieurs modes vibratoires, chacun d'eux correspondant à une certaine répartition des noeuds et des ventres de pression à l'intérieur du
.../

tuyau. Pour chaque mode vibratoire existe une fréquence propre appelée partiel du tuyau (Le premier partiel ou fondamental du tuyau a la fréquence la plus basse). Enfin, chaque partiel peut comporter un certain nombre d'harmoniques ou multiples entiers de sa fréquence. Il se trouve que dans les cas théoriques, la série des partiels d'un tuyau cylindrique ouvert aux deux bouts correspond aux harmoniques du partiel 1 de ce tuyau (son le plus grave), mais dans la réalité, ceci n'est juste qu'en première approximation, et il importe de bien distinguer les partiels des harmoniques.

Les lois classiques des tuyaux sonores sont bien connues; on les trouve dans les manuels de physique (Bib.7) et nous les avons déjà exposées à propos de la flûte traversière (Bib.8). Rappelons cependant quelques notions fondamentales.

- TUYAUX CYLINDRIQUES

Soit un tuyau ouvert aux deux bouts. Si L est sa longueur et V la célérité du son à une température donnée, la fréquence du partiel 1 du premier mode vibratoire est donnée par la formule :

$F_1 = \frac{V}{2L}$. De même on a pour le partiel 2 , $F_2 = 2 \frac{V}{2L}$ pour le partiel 3 , $F_3 = 3 \frac{V}{2L}$, le partiel 4 , $F_4 = 4 \frac{V}{2L}$ et ainsi de suite.

Si le tuyau est fermé à un bout, le partiel 1 a pour fréquence , $F_1 = \frac{V}{4L}$ et les autres , $F_2 = 3 \frac{V}{4L}$, $F_3 = 5 \frac{V}{4L}$ etc...

Les tuyaux d'orgue ne fonctionnent que sur le premier mode vibratoire (à l'exception de la flûte harmonique) mais il convient de tenir compte des autres modes vibratoires car ils déterminent en partie le timbre en agissant sur la répartition de l'énergie dans les harmoniques du partiel 1 comme on verra plus loin.

- TUYAUX CONIQUES

D'après la théorie (Bib. 7 p.618) un tuyau tronconique ouvert à ses deux extrémités présente la même série de partiels que le tuyau cylindrique de même longueur. Mais nous verrons, que dans la réalité il n'est pas indifférent que l'on embouche ce tuyau par le petit ou par le gros bout.

2°) L'excitateur ou système lame d'air-biseau

Il s'agit de former une lame d'air que l'on dirige sur un obstacle généralement biseauté. Dans une flûte l'obstacle est réalisé en un point donné de la paroi du tuyau. L'orifice de sortie de l'air est appelé lumière.

Les observations de Z. CARRIERE (bib.9) et ISING (Bib.10 et 11) ont montré que la lame d'air oscille de part et d'autre du biseau et que cette oscillation s'accompagne de phénomènes compliqués, enrroulements, tourbillons dont le rôle est encore mal connu.

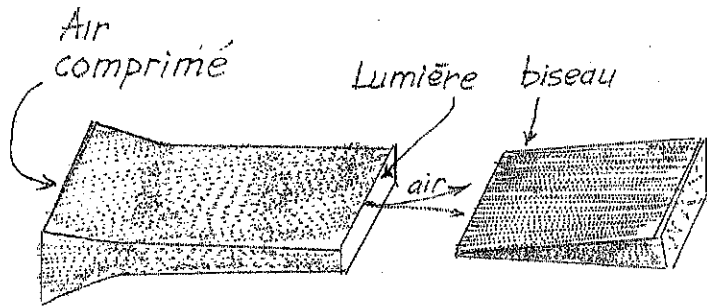


Figure 1

Ce système de lame d'air oscillante est sonore par lui-même. Il existe plusieurs régimes donc plusieurs séries de sons possibles. Pour relever les courbes de fréquence appelée " courbes buccales " (Bib. 4 p. 205) on porte sur un graphique la pression en abscisse et la ou les fréquences perçues en ordonnée (plusieurs régimes peuvent coexister). On voit fig.2 que pour une pression donnée, les fréquences des régimes 2, 3, 4, sont pratiquement comme les multiples 2, 3, 4 de la fréquence correspondante du régime 1.

Si on augmente la distance lumière-biseau, l'ensemble des courbes se déplace vers le bas : la fréquence baisse.

Le nombre et l'intensité des harmoniques de chaque régime, ainsi que la proportion de bruit d'écoulement dépendent de la forme de l'oscillation, donc de l'état des arêtes de la lumière et du biseau, de la forme de la lumière, de la place du biseau par rapport à la lumière. Nous retrouverons tous ces paramètres à propos de l'harmonisation du tuyau d'orgue.

3°) Le tuyau à embouchure de flûte

Lorsqu'on associe un tuyau à un système lame-d'air-biseau le fonctionnement devient passablement compliqué car les parties réagissent les unes sur les autres. On distingue nettement deux modes de fonctionnement : (Bib. 4 p. 201-202).

- REGIME BUCCAL

Faisons croître très progressivement la pression de l'air envoyé dans l'ajutage. On entend tout d'abord un son assez faible dont la fréquence monte avec la pression. Il s'agit de l'un des régimes du son de biseau. Lorsque la fréquence du son de biseau atteint celle de l'un des partiels du tuyau celui-ci agit comme un résonateur. On entend alors une suite de sons quasi-stables, plus intenses dont les fréquences correspondent aux partiels du tuyau. Ceux-ci n'apparaissent pas obligatoirement dans l'ordre. Les sauts que l'on constate sont dus au fait que le son de bouche change assez capricieusement de régime. La fig. 3 fait comprendre ce mécanisme.

- REGIME NORMAL

Augmentons encore la pression. Brusquement les phénomènes changent de nature. Nous entendons de nouveau le partiel 1 (fondamental) du tuyau mais il est cette fois beaucoup plus intense et il reste stable dans une gamme de pression beaucoup plus large. Nous sommes dans le régime normal. Maintenant le tuyau réagit sur le son de bouche en lui imposant sa fréquence. Si nous continuons à augmenter la pression, nous obtenons la suite normale des partiels du tuyau.

...../

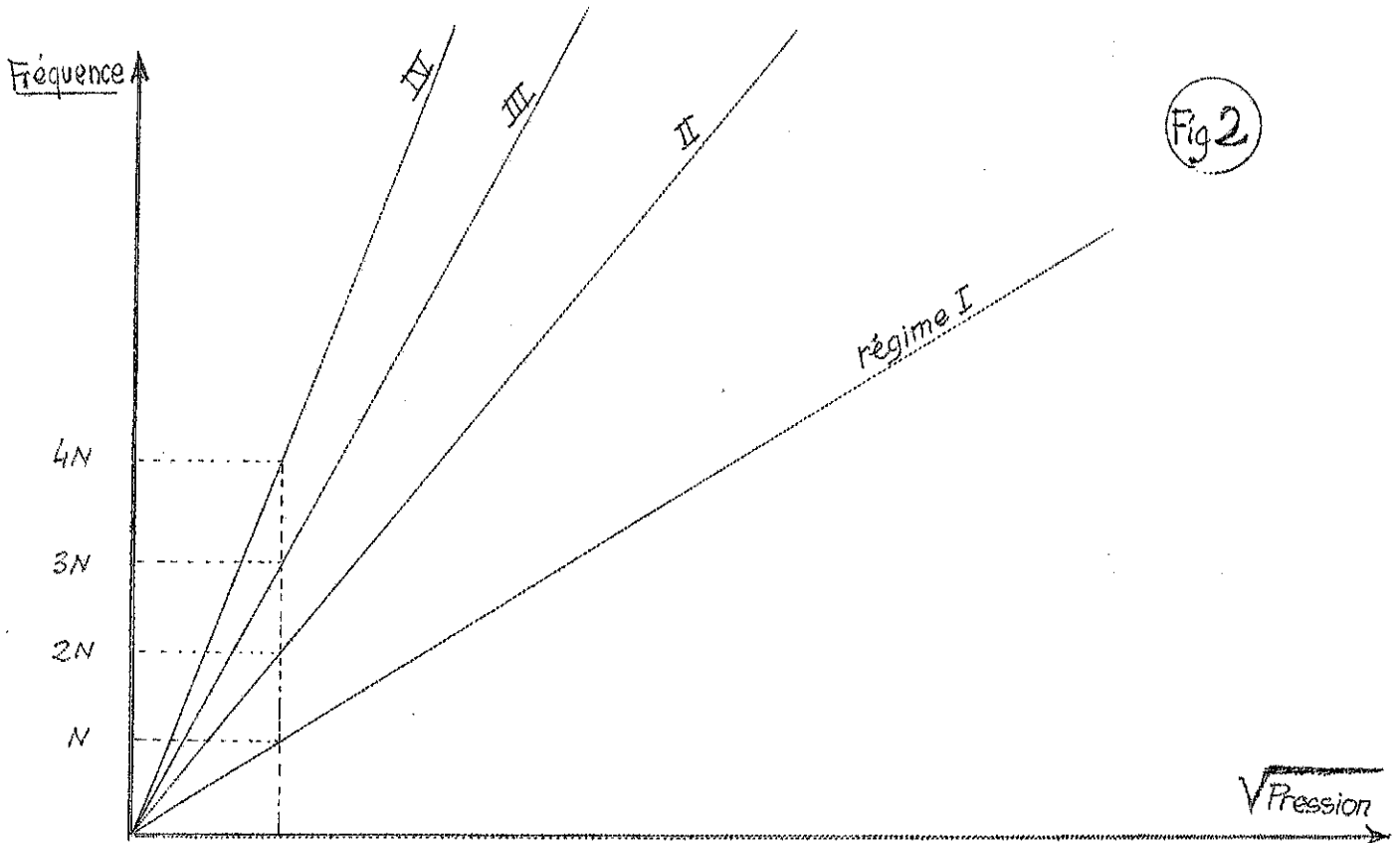
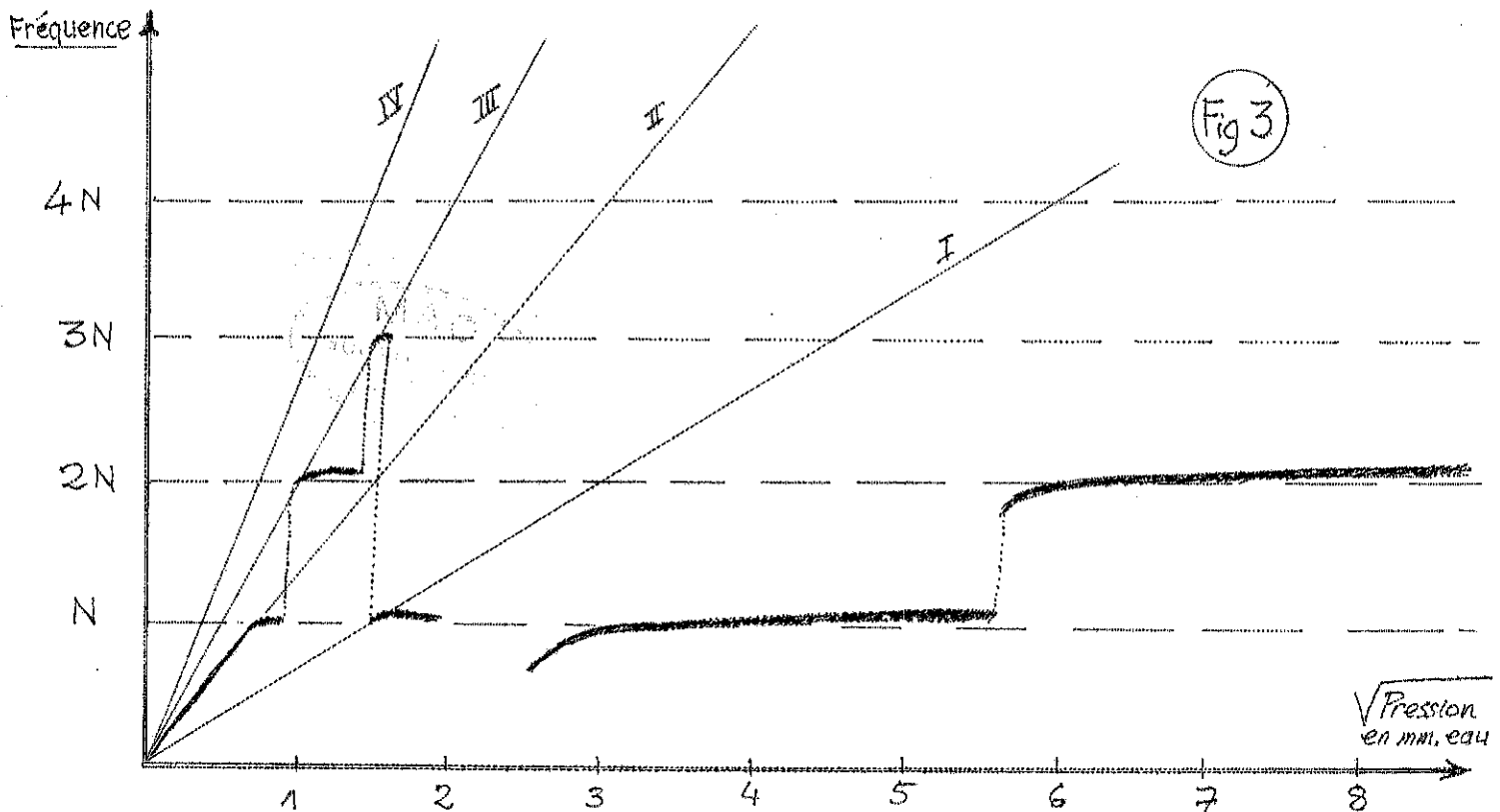


Fig 2
 Courbes buccales schématisques d'une bouche seule. On'obtient généralement qu'une portion des courbes, d'autre part, elles ne passent pas par l'origine.



← RÉGIME BUCCAL → ← RÉGIME NORMAL →

Associée à un tuyau, la bouche ne fonctionne plus que sur les fréquences correspondant aux partiels du tuyau et aux harmoniques de ceux-ci. ($N, 2N, 3N$ etc...). les partiels sont accrochés en régime 1, 2, ou 3 etc. d'où les sauts. En régime normal les sons de bouche sont beaucoup plus aigus que le fondamental du tuyau. Dans l'exemple ci-dessus, si $N = do_3$, on aura, en régime buccal: do_3, da_4, sol_4, do_5 , puis, en régime normal: do_3, do_4 etc..

En musique les tuyaux sont toujours employés en régime normal et en orgue, seul le partiel 1 est utilisé. Mais il était important d'attirer l'attention sur les phénomènes buccaux car ils jouent un rôle prépondérant dans l'attaque du tuyau. Le régime buccal ne dure quelquefois que 10 ou 20 ms mais il est parfaitement perçu et intégré dans la sensation de timbre. Nous allons maintenant rendre compte des expériences faites sur les tuyaux d'orgue. Dans ce but nous avons réalisé une installation sommaire mais suffisante pour les besoins.

III - METHODE ET APPAREILLAGES

1°) SCHEMA DE L'INSTALLATION DES EXPERIENCES

La figure 4 montre la disposition des appareils.

SCHEMA DE L'INSTALLATION

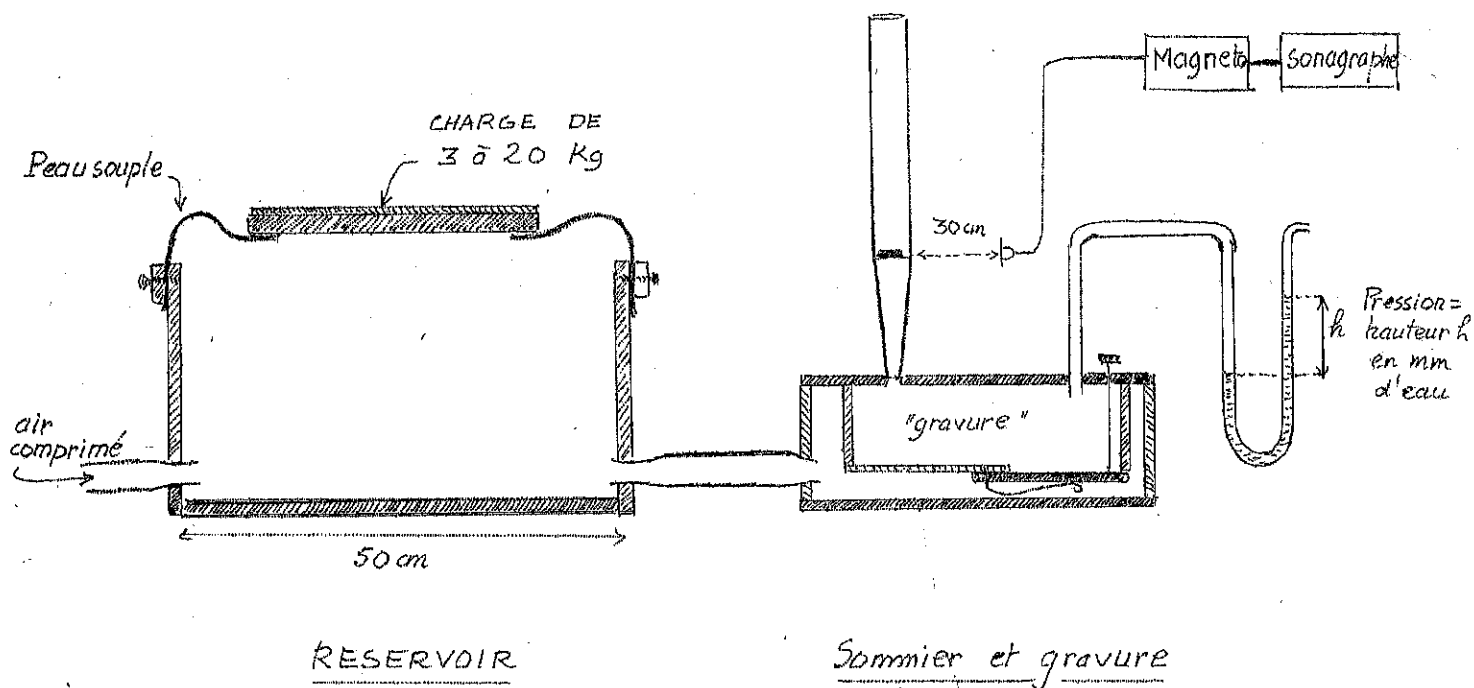
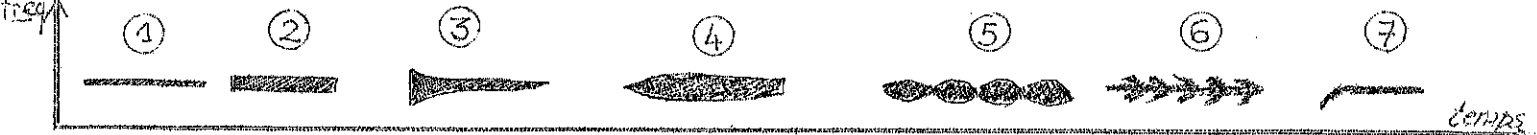


Figure 4

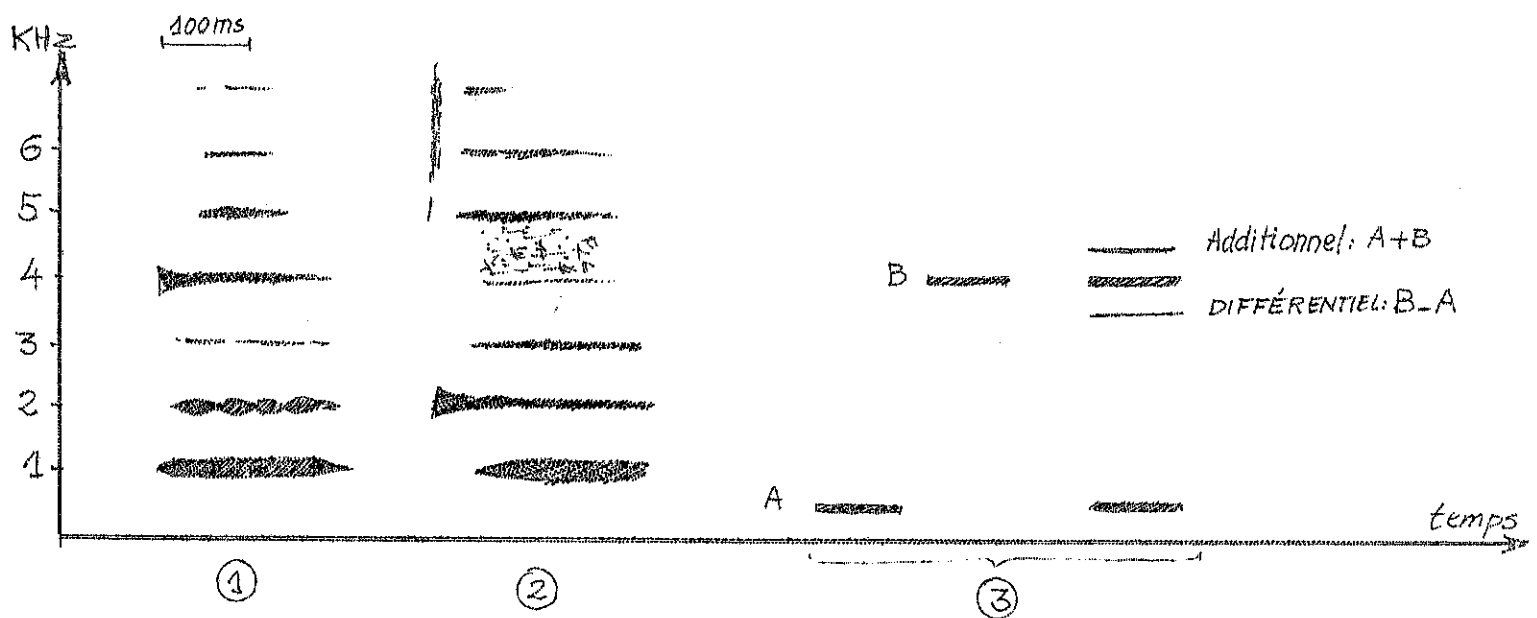
(*) Nous remercions bien vivement M. J. PERROT pour les tuyaux qu'il nous a laissés après le démontage de l'orgue hydraulique, et M. WALTHER pour ceux qu'il nous a obligeamment envoyés.



①. son de fréquence et d'intensité fixe. ②. son de même fréquence, plus intense. ③. son dont l'intensité s'établit quasi-instantanément, puis décroît (attaque brutale) ④. son dont l'intensité s'établit très graduellement (attaque progressive) ⑤. son affecté de battements (variations périodiques d'intensité) ⑥. son instable (grésillement) ⑦. variation de fréquence à l'attaque : glissando ascendant.



① Son Harmonique théorique. L'intensité décroît avec le rang de l'harmonique. La hauteur perçue correspond à la fréquence du fondamental. ② Partiel 1 d'un tuyau (fondamental) accompagné de ses harmoniques, puis saut au partiel 2. Celui-ci est plus haut que l'Hz du partiel 1. L'intervalle entre les 2 partiels est plus grand que l'octave. ③. Son inharmoniques (ou son à partiels). On ne détecte pas d'équidistance entre les composantes. La hauteur perçue est complexe et dépend d'un grand nombre de facteurs. ④ Bruits de souffle d'abord aigu puis grave. ⑤ chocs, percussions, aigu puis grave, ce dernier est prolongé par une résonance grave



① Son harmonique réel, évolutif. Le fondamental est le plus intense. L'Hz₂, affecté de battements démarre avec un léger retard. L'Hz₃ est très faible. L'H₄ apparaît en même temps que le fondamental. Son intensité, d'abord très grande, diminue par la suite. Les Harmoniques 5, 6, 7 ont un grand retard à l'attaque ② son octaviant à l'attaque (voir Hz₂). On note aussi des bruits à l'établissement du son, entre 5000 et 7000 Hz, et un bruit d'écoulement entre 4000 et 5000 Hz. ③ Soient un son A de 500 Hz et un son B de 4000 Hz. Lorsqu'on joue ces deux fréquences simultanément il se produit des sons de combinaison qui sont principalement : l'additionnel (freq. de A + freq. de B) et le différentiel : (freq. de B - freq. de A).

Le réservoir est une boîte en bois étanche dont le couvercle, raccordé aux bords par de la peau souple, peut s'élever ou s'abaisser selon les variations de débit. La pression constante et réglable dépend de la charge déposée sur cette planche. Le réservoir est alimenté par de l'air comprimé. Il communique avec le "sommier", boîte de plus petites dimensions à l'intérieur de laquelle est collé un casier étanche, la "gravure" (305 x 15 x 65). Celle-ci communique avec le sommier par une soupape commandée de l'extérieur. L'expérience montre que la gravure est nécessaire si on veut éviter des oscillations de la pression se produisant dans l'ensemble réservoir - porte-vent - sommier et qui seraient fort gênantes pour les expériences.

Pour relever la pression dans la gravure on y place l'extrémité d'un tube de caoutchouc résistant relié à un manomètre à eau. On exprime la pression en "millimètres d'eau" (poids de la colonne de liquide déplacé par unité de surface).

Un microphone (dynamique) relié à un magnétophone est placé à 30 cm en face de la bouche du tuyau.

A partir de ces dispositions nous avons pu faire quelques expériences dont les résultats peuvent être transposables à l'orgue réel.

2°) L'ANALYSE AU SONAGRAPHE (voir pl II)

Une forme acoustique comporte nécessairement trois dimensions : la fréquence, le temps et l'intensité. Les appareils classiques d'analyse permettent d'obtenir des renseignements précis dans chacun de ces domaines; mais du point de vue perceptif, c'est la variation simultanée de la fréquence et de l'intensité en fonction du temps qui est significative.

Les appareils du type "visible speech" comme le sonographe présentent donc un grand intérêt dans le domaine de la psycho-physiologie de l'audition, car ils fournissent une véritable "photographie" du son, dont l'interprétation est relativement simple.

La figure ci-contre fournit quelques exemples du solfège sonographique. La fréquence se lit en ordonnée, le temps en abscisse et l'intensité croît comme la noirceur et l'épaisseur des traits.

A partir de ces documents nous avons pu reprendre l'étude du tuyau d'orgue à embouchure de flûte dans une optique nouvelle.

IV - PARAMETRES LIES A LA COLONNE D'AIR (Le tuyau ou résonateur)

Les lois des tuyaux sonores que nous avons rappelées plus haut supposent des conditions aux extrémités bien définies : On considère que le tuyau est soit ouvert, ou fermé aux deux bouts, soit ouvert à l'un et fermé à l'autre. Malheureusement aucun instrument de musique ne correspond à de telles abstractions théoriques. On a toujours affaire à des tuyaux partiellement ouverts seulement du côté de l'excitation.

Que se passe-t-il donc dans un tuyau ouvert aux deux bouts lorsqu'on ferme progressivement une extrémité ?

...../

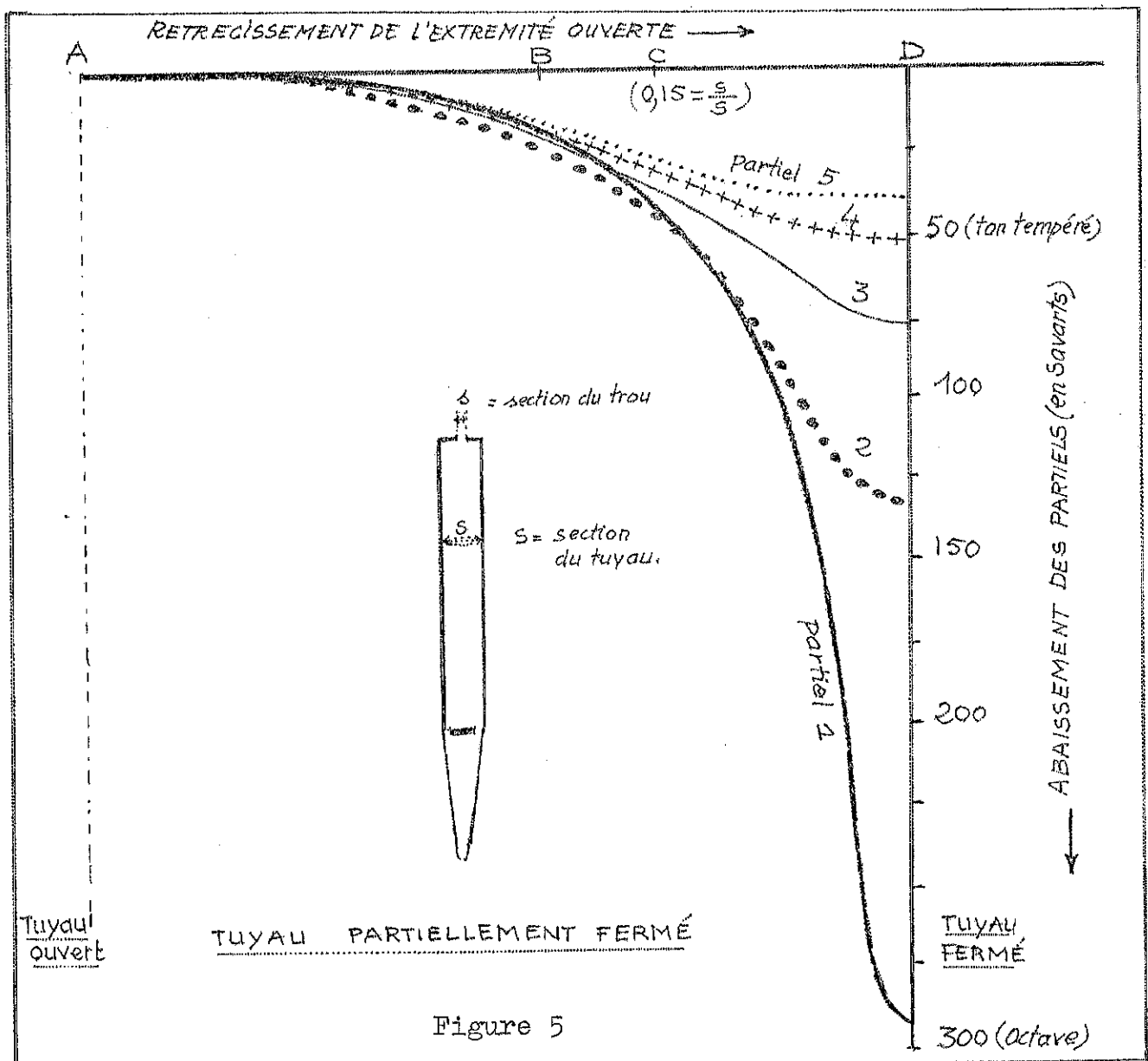


1°) Passage du tuyau ouvert au tuyau fermé (Bib. 3 p. 95)

Soit un tuyau ouvert de fréquence fondamentale 1000 Hz. Les partiels sont 2000, 3000, 4000, 5000 Hz etc...

Le tuyau de même longueur, fermé à une extrémité aura pour fondamental 500 Hz et pour partiels 1500, 2500, 3500, 4500 Hz etc.. On voit que tous les partiels ont été abaissés d'une même quantité en fréquence, ici 500 Hz; Les rapports entre les partiels successifs ne sont donc plus les mêmes. On est passé de la série $F = K.N$ à la série $F = (2k + 1) N$ où K est un nombre entier quelconque et N la fréquence du partiel 1 ou fondamental. Comment se fait le passage d'une série à l'autre ?

L'expérience montre que lors du recouvrement graduel, le son baisse de façon continue mais pas régulière. Tant que le rétrécissement de l'ouverture n'a pas atteint la moitié de la surface totale, l'effet est peu perceptible (fig.5).



Au delà de cette valeur, (B sur la figure) on perçoit nettement un abaissement de la hauteur qui s'accroît considérablement lorsque le rapport de la section trou (s) sur la section (S) du tuyau atteint environ 0,15 (C sur la figure) et lorsque le tuyau est com-

plètement bouché à un bout, le partiel 1 a baissé d'une octave. Le graphique montre, entre autres, que la moindre fuite d'air dans la calotte d'un bourdon en change considérablement l'accord mais aussi la sonorité car le tuyau parle très mal dans la zone C-D. La conclusion la plus importante concerne les rapports entre les partiels. Tant que le rapport s/S reste supérieur à 0,5 les partiels ne sont pas plus affectés que le fondamental et ils sont toujours " justes ". Au delà on constate un abaissement en fréquence de même quantité pour chaque partiel ce qui a pour conséquence de fausser leurs rapports. A l'oreille, ils paraissent trop hauts, car leur fréquence est supérieure à celle des harmoniques du partiel 1 ou fondamental. Lorsque le trou devient très petit, la fausseté s'accroît considérablement puis on passe à un autre système de référence, les partiels d'un tuyau fermé. Dans l'orgue, le rapport s/S de la section de la bouche à la section du tuyau est généralement compris entre 0,30 et 0,15. C'est la bonne zone. Au delà, les partiels sont plus justes, mais le débit de la bouche deviendrait trop important; en deçà, le tuyau parle mal et les partiels sont très faux.

2°) Rôle de la taille

Nous appelons taille d'un tuyau le rapport L/D de la longueur sur le diamètre. Quand ce rapport est grand (entre 20 et 30) le tuyau est dit de petite taille et inversement. (Les adjectifs petit ou gros se rapportent en fait au diamètre qui est comme l'inverse de la taille).

A surface de bouche égale, les tuyaux de grosse taille auront donc des partiels plus faux que les tuyaux de petite taille.

3°) Conséquences

a) La fréquence d'un tuyau ouvert à un bout et partiellement fermé à l'autre de longueur L est toujours plus basse que celle donnée par la formule $V/2L$. Il existe d'ailleurs de nombreuses formules de corrections utilisées pour couper les tuyaux à bonne longueur. Ces formules font intervenir le diamètre, donc tiennent compte de la taille.

b) Rapports des partiels et timbre du son.

Soit un tuyau ouvert aux deux bouts, de fréquence 100 Hz. Les partiels accompagnés de leurs harmoniques respectifs sont :

partiel 1 ou fondamental	}	100	200	300	400	500	600	etc...
Partiel 2			200		400		600	etc...
Partiel 3				300			600	etc...

On voit que tous les harmoniques des divers partiels coïncident tous avec ceux du partiel 1 ou fondamental du tuyau.

En orgue, le tuyau fonctionne toujours en régime 1 mais comme les autres régimes coexistent plus ou moins, on obtiendra dans ce cas idéal un son riche en harmoniques, l'intensité de ceux-ci

...../

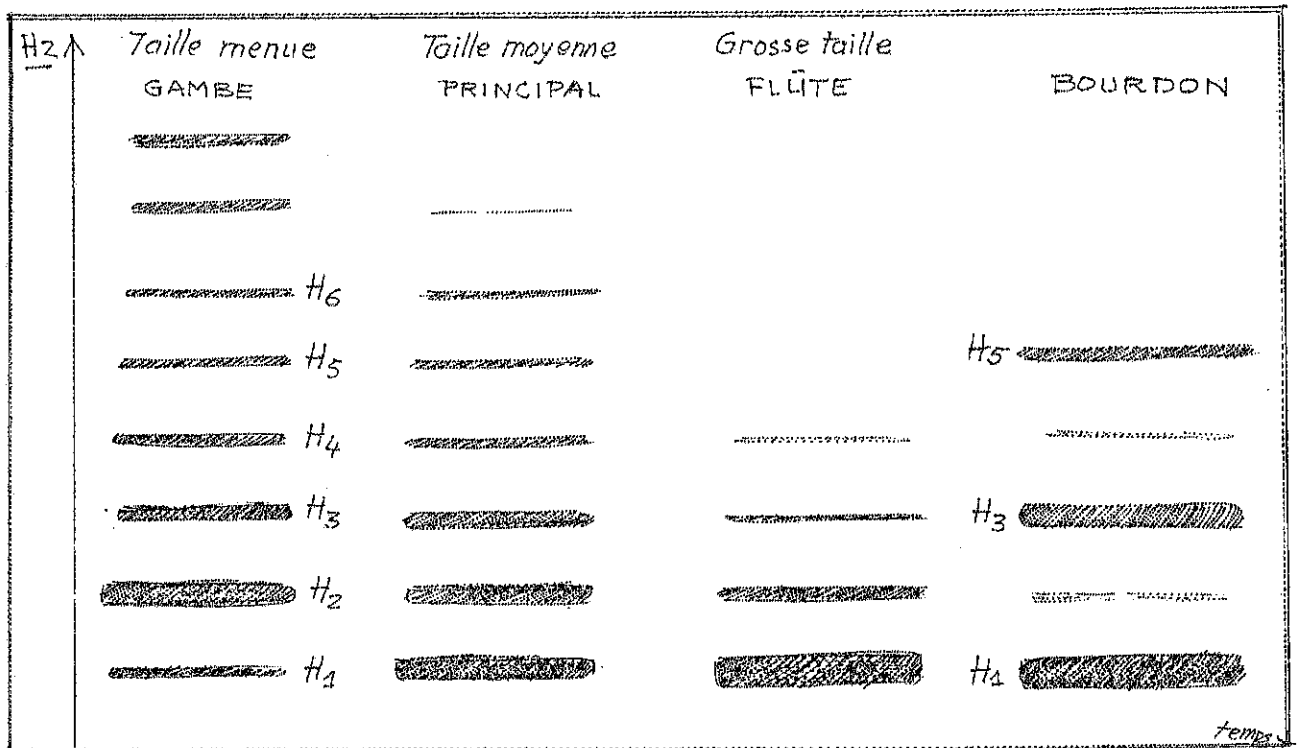
diminuant avec leur rang.

Considérons maintenant un tuyau d'orgue normal c'est-à-dire partiellement fermé à la bouche. (Les valeurs numériques choisies sont arbitraires).

partiel 1 ou fondamental	}	100	200	300	400	500	600	etc...
partiel 2			220		440		660	etc...
partiel 3				325			650	etc...

Ici les harmoniques des divers partiels ne coïncident plus. Ainsi, le partiel 2 est plus haut que l'harmonique 2 du partiel 1. Dans ce cas, il peut arriver que deux fréquences non harmoniques coexistent, on entend alors des battements; mais le plus souvent, les harmoniques du fondamental l'emportent au détriment d'une perte d'énergie qui se traduit par l'affaiblissement de ces harmoniques : le timbre s'appauvrit.

En résumé, plus les partiels 2, 3, 4 etc. d'un tuyau sont proches des harmoniques du partiel 1 ou fondamental du tuyau, plus les harmoniques du son du tuyau sont nombreux. C'est généralement le cas des tuyaux de petite et de moyenne taille. A l'opposé, lorsque les partiels sont très faux, on n'obtient que 2 ou 3 harmoniques et l'intensité est généralement concentrée dans le fondamental, comme pour les tuyaux de grosse taille de la famille des flûtes. Si nous représentons les harmoniques sous forme de traits équidistants, comme sur un sonagramme, l'intensité étant donnée par la largeur du trait, nous pouvons dessiner schématiquement les quatre types de timbre fondamentaux (fig.6) des tuyaux à bouche de l'orgue.

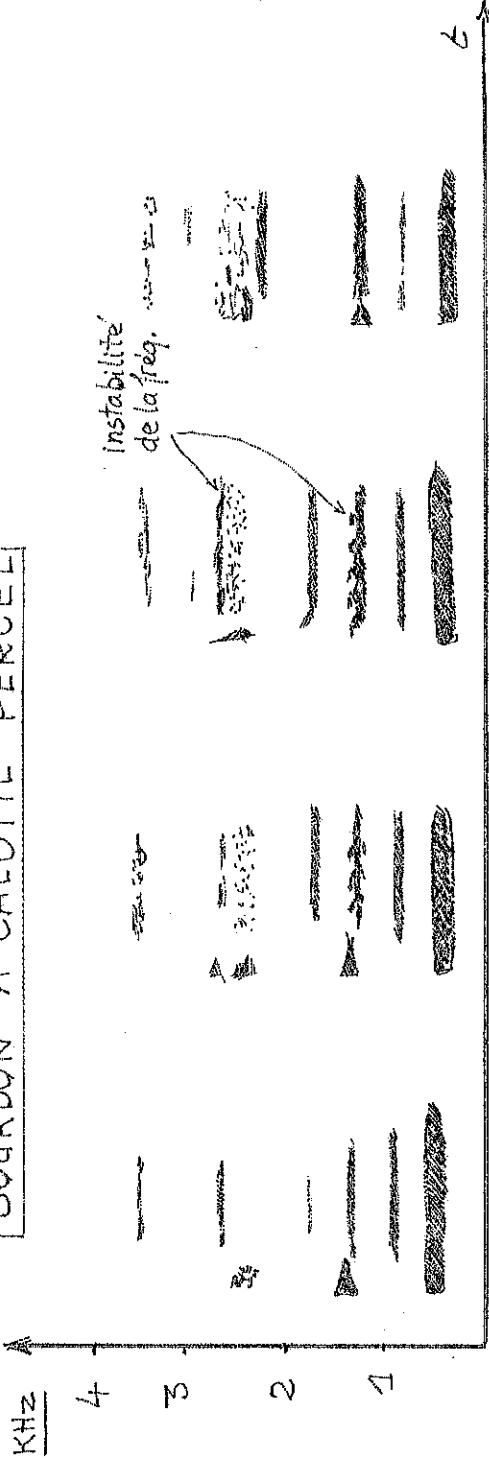


REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA COMPOSITION SPECTRALE DES PRINCIPAUX TYPES DE TUYAUX A BOUCHE DE L'ORGUE.

Figure 6

...../

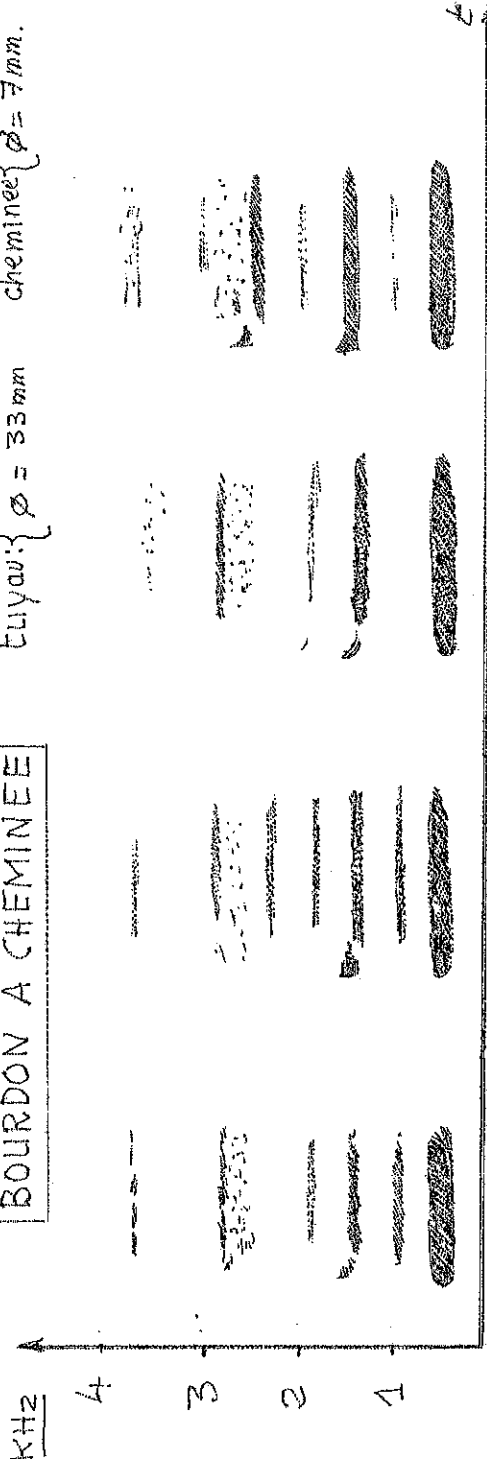
BOURDON A CALOTTE PERCEE



Diamètre du trou $\phi = 4,5 \text{ mm}$ $\phi = 2,5 \text{ mm}$ $\phi = 3,5 \text{ mm}$ $\phi = 7 \text{ mm}$

tuyau: $\begin{cases} L = 150 \text{ mm} \\ \phi = 33 \text{ mm} \end{cases}$ cheminée: $\begin{cases} L = \text{variable} \\ \phi = 7 \text{ mm} \end{cases}$

BOURDON A CHEMINÉE



$\frac{L}{\phi} = 1,5$ 2 3 6

Fréquence: $L_{A_3} - 3 \text{ savants}$ $L_{A_3} + 11\%$ $L_{A_3} + 9$

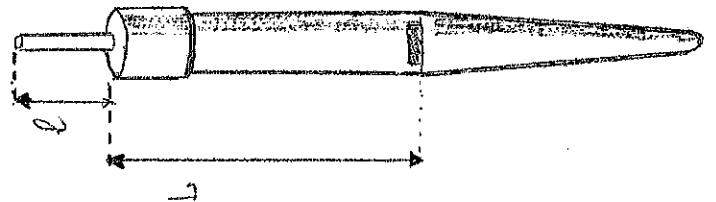
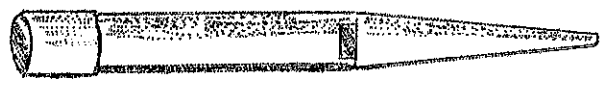


Fig 7

EXPERIENCE DE RACCOURCISSEMENT DE LA CHEMINÉE

4°) Cas des tuyaux à cheminée

Ce sont des bourdons dont la calotte se prolonge par un petit tuyau cylindrique ouvert aux deux bouts appelé cheminée. Depuis longtemps les facteurs d'orgue ont mis au point ce type de tuyau qui réalise la transition entre le tuyau ouvert et le tuyau fermé. Les proportions de la cheminée varient selon les types de jeux et selon les facteurs.

Les avis sont partagés quant au rôle de ce petit tube. BOUASSE consacre un long chapitre aux tuyaux à cheminée (Bib. 4 p. 320 à 346) et conclut qu'ils sont " caractérisés par l'obtention d'un accord faux dont les notes constituantes aiguës sont assez faibles et distantes du fondamental. Cette particularité est due au fait que les partiels ne sont jamais harmoniques du fondamental ".

Il est certainement possible d'harmoniser un tuyau à cheminée de façon qu'il émette simultanément le fondamental et un ou deux partiels faux mais nous n'avons rien rencontré de tel dans les nombreux jeux de tuyaux à cheminée que nous avons enregistrés. L'analyse au sonographe montre un spectre typique de tuyau bouché (harmoniques impairs prédominants) particulièrement net et souvent plus riche que celui d'un bourdon ordinaire.

L'expérience suivante que nous avons faite porte sur un seul tuyau mais elle est assez significative.

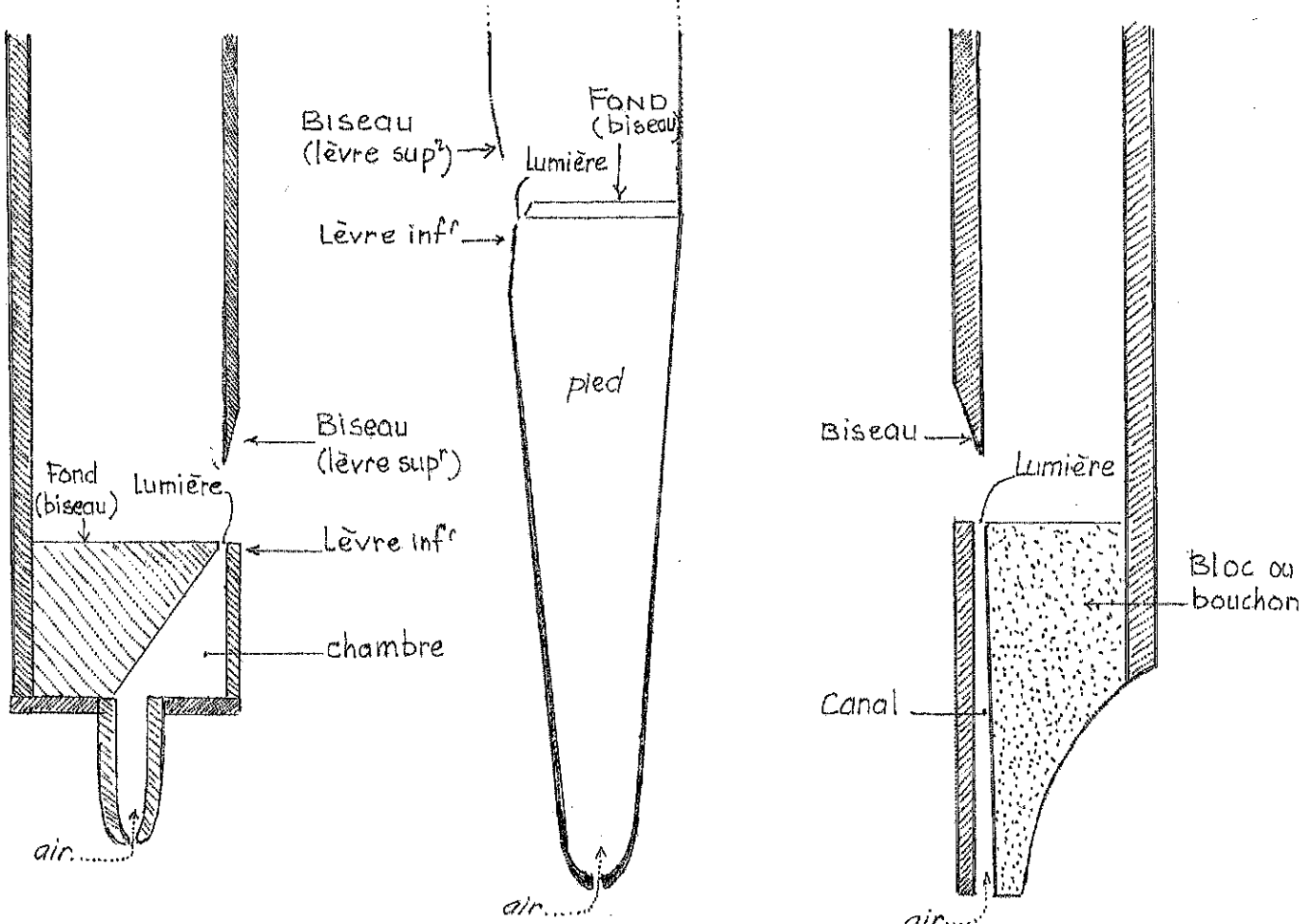
On prend un tuyau à cheminée (fig.7) dont on va raccourcir la cheminée par étapes. Au fur et à mesure du raccourcissement, la fréquence fondamentale du tuyau monte, mais les partiels étant affectés différemment; le timbre change. Pour chaque longueur de la cheminée nous avons remplacé la calotte munie de sa cheminée par une calotte percée d'un trou tel que la fréquence du tuyau restait la même dans les deux cas. Ceci permet de mettre en évidence le rôle de la cheminée.

On observe, à chaque étape de nettes différences dans la répartition de l'intensité sur les harmoniques, mais il n'y a pas d'écarts importants entre le tuyau à cheminée et le même tuyau muni d'une calotte percée. Dans les deux cas l'évolution se fait dans le même sens : un renforcement des harmoniques impairs, au fur et à mesure que la fréquence monte.

Il s'agit bien sûr d'un cas particulier. Nous n'aurions peut être pas les mêmes résultats avec une cheminée de très gros diamètre. De toutes façons la cheminée ne joue pas ici le rôle que lui attribue HELMHOLTZ ou BOUASSE puisque sa présence ou son absence n'introduisent pas de changement considérable dans le timbre.

En fait le tuyau à calotte percée parle plus difficilement : l'attaque est moins nette, il y a plus de bruits d'écoulement et les harmoniques sont un peu instables (sorte de grésillement). Mais l'utilisation de la cheminée par les praticiens traditionnels se justifie par une autre raison : celle du réglage de la hauteur du son. Lorsqu'on perce un trou dans la calotte, il faut le faire avec une très grande précision. Dans notre expérience, quand le trou passe de 2 mm à 2,5 mm de diamètre, le son monte d'un quart-ton et le timbre est complètement modifié... alors qu'en utilisant la cheminée il fallait raccourcir celle-ci de 25 mm pour obtenir le même

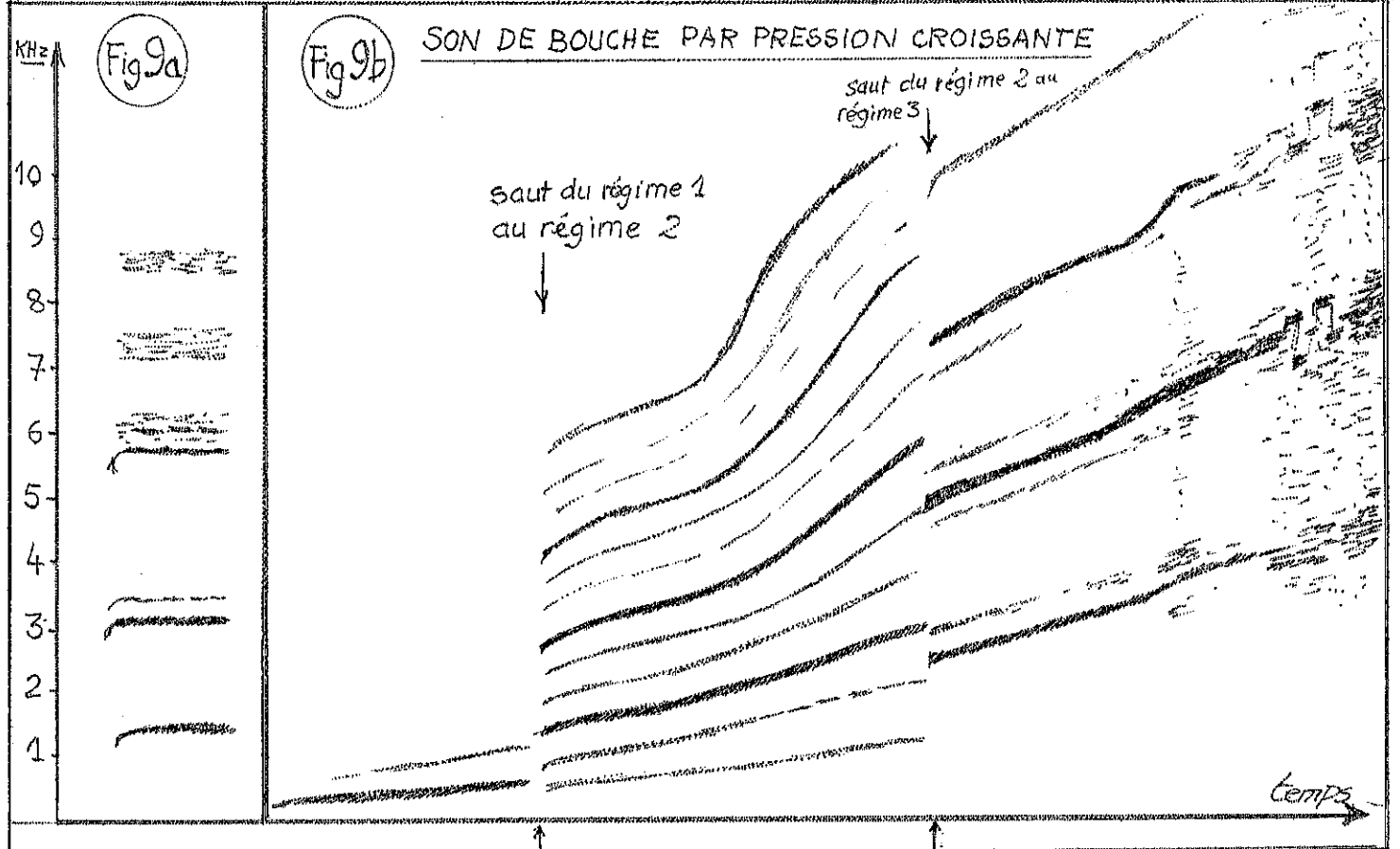
Fig 8



TUYAU D'ORGUE en BOIS
(il en existe d'autres types)

TUYAU D'ORGUE en MÉTAL

FLÛTE A BEC



résultat. En conclusion, la cheminée permet un réglage souple et précis du timbre et de la hauteur des tuyaux.

5°) Tuyaux coniques

Faute de tuyaux à bouche de cette famille nous n'avons pas pu expérimenter directement. Quand la base du cône (gros diamètre) se raccorde à la bouche, le tuyau est du type "fuseau"; il a selon Dom BEDOS (Bib. 12) à peu près la même harmonie que le tuyau à cheminée (flûte à fuseau, Gemshorn). Quand le sommet du tronc de cône est raccordé à la bouche, le tuyau porte alors seulement dans ce cas le nom de "conique". Les tuyaux coniques seraient plus éclatants que les tuyaux ouverts. Tout dépend du degré de côneité et surtout des opérations d'harmonisation à la bouche qui sont déterminantes pour le timbre comme nous allons le voir maintenant.

V - PARAMETRES LIES AU SYSTEME EXCITATEUR

1°) Description

Le système excitateur des tuyaux d'orgue comprend deux parties : le pied et la bouche.

Tuyaux de bois (fig. 8a)

L'air conduit par le pied, petit tube très court arrive dans une cavité, la chambre, et sort par la lumière. On désigne par ce nom l'espace laissé entre le fond, et la lèvre inférieure. A la sortie de la lumière le jet d'air rencontre le biseau, situé généralement au milieu et à quelque distance de celle-ci. Cette terminologie risque de heurter les organiers d'autant qu'ils emploient, et depuis fort longtemps, les mêmes mots dans des sens différents. Mais c'est la terminologie utilisée en physique et qui s'applique généralement à tous les instruments à embouchure de flûte. Le "biseau" est l'obstacle que rencontre le jet d'air à la sortie de la lumière; il convient de garder le même nom, aussi bien pour une flûte à bec que pour un tuyau d'orgue. Les termes employés en facture d'orgue sont indiquées entre parenthèses; on voit quelles confusions risquent de se produire si on ne précise pas le sens des mots que l'on emploie.

Tuyau d'étain (fig. 8b)

Le pied y est beaucoup plus long; entre 16 et 25 cm selon les orgues. Le fond est réduit à une plaque de métal circulaire, soudée au tuyau sur son pourtour, sauf à la partie droite qui forme avec la lèvre inférieure, la lumière.

Le type du tuyau d'étain, le plus répandu dans l'orgue est remarquable par sa simplicité de structure et par les possibilités de réglage qu'il offre, du fait de la malléabilité du métal.

...../

2°) Le son de biseau ou son de bouche

Pour l'obtenir isolément sans être obligé de couper le tuyau on annule l'action de ce dernier en le remplissant avec du chiffon ou du coton. Il faut prendre garde à bien dégager la lèvre supérieure, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur, et à ne pas laisser de cavité près de la lumière, qui pourrait jouer le rôle d'un résonateur. L'analyse spectrographique réserve quelques surprises. "Le" son de bouche est en fait composé d'un certain nombre de fréquences plus ou moins harmoniques et de bandes de bruit généralement assez aiguës, de 1000 à 12000 Hz et plus (Fig. 9a).

Lorsqu'on fait varier la vitesse de sortie de l'air à la lumière, de façon progressive et régulière par exemple en ouvrant graduellement la soupape d'arrivée de l'air, on entend un glissando ascendant entrecoupé de sauts à l'octave, à la quinte, du fait des différents régimes. La proportion de bruit augmente avec la vitesse de l'air, et au delà d'une certaine valeur le son de bouche se transforme en bruissement de hauteur indéfinie (Fig. 9b).

3°) Rôle du son de bouche dans l'attaque du tuyau

Les moyens actuels d'analyse spectrographiques, dont n'osaient rêver nos prédécesseurs permettent de saisir des phénomènes extrêmement brefs, comme ceux qui se passent à l'attaque d'un tuyau, et pour lesquels on ne pouvait auparavant que formuler des hypothèses. Pour décomposer les phénomènes nous procédons de la façon suivante. Nous enregistrons tout d'abord le son de bouche. Le tuyau est étouffé et on actionne normalement la soupape, deux ou trois fois consécutives. Puis le tuyau est dégagé et on recommence l'opération en l'enregistrant à son tour. La confrontation des deux analyses permet de comprendre ce qui se passe.

La figure 10 montre en (a) les harmoniques théoriques du tuyau en régime fondamental.

En (b) on a l'analyse du son de bouche joué normalement. On note une très brève évolution en fréquence, au début (quelques ms). Elle correspond au temps d'établissement de la pression, à l'ouverture de la soupape. La composante la plus grave, (régime 1) est généralement faible. Le bruit se situe dans la partie aiguë du spectre. En (c), on montre le son normal du tuyau. Lors du transitoire d'attaque le tuyau fonctionne en régime buccal : il sert de résonateur au son de bouche, dont une des fréquences seulement, souvent la plus intense accroche un des partiels du tuyau. Dans l'exemple que nous donnons, c'est le partiel 4 du tuyau qui est accroché. Comme il est plus haut que l'harmonique 4 du partiel 1, on distingue nettement l'un de l'autre.

Il existe dans le transitoire d'attaque des fréquences que l'on ne trouve pas dans le son de bouche.

Il y a tout d'abord l'harmonique 2 et quelquefois l'harmonique 3 du partiel accroché. Mais le plus souvent on repère sur le sonagramme plusieurs fréquences équidistantes de part et d'autre du fondamental du partiel accroché. Simultanément on voit apparaître le fondamental du tuyau. L'analyse révèle que ces fréquences sont des sons additionnels et différentiels principalement en-

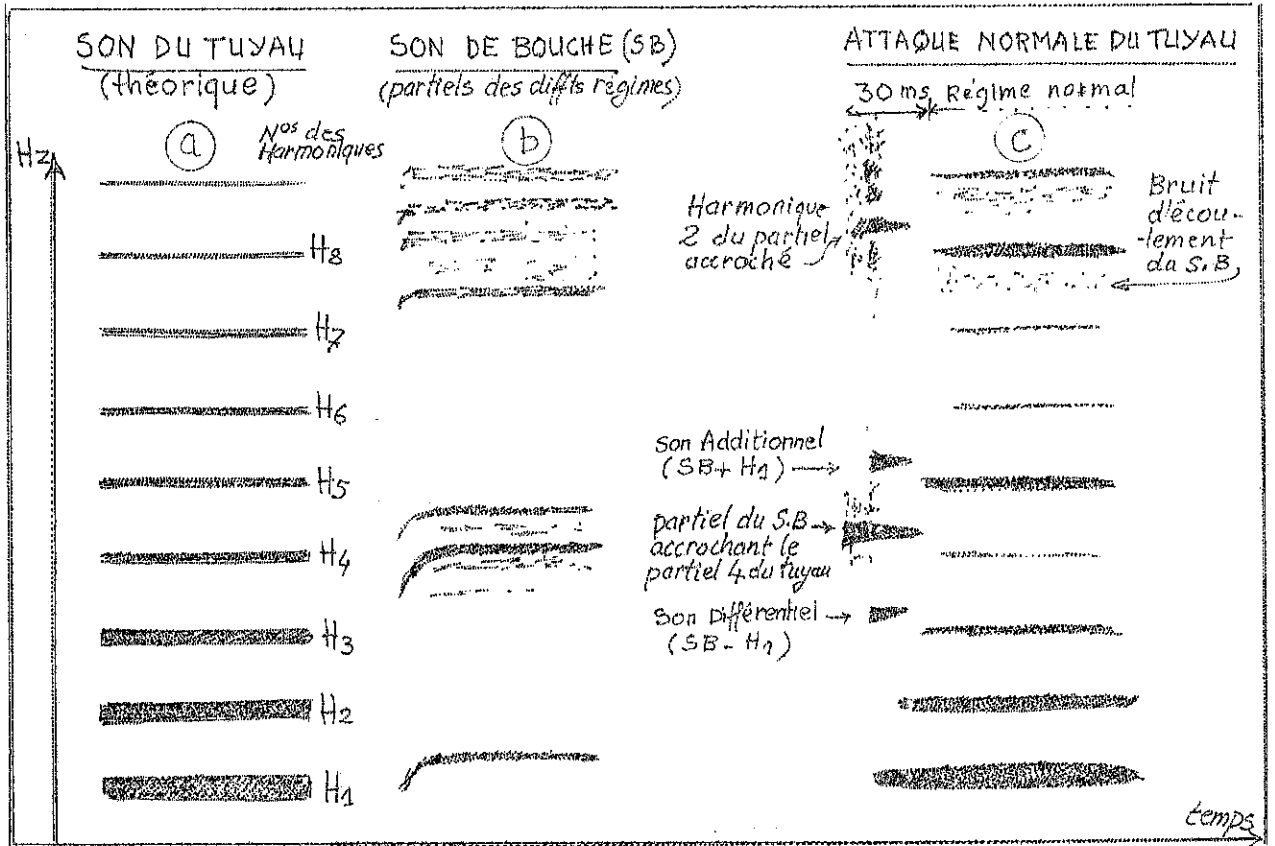


Figure 10

tre le fondamental du partiel accroché et le fondamental du tuyau. Il s'en produit aussi entre les harmoniques ce qui ne simplifie pas les choses

Finalement les harmoniques du tuyau apparaissent, nous sommes dans le régime normal. L'harmonique correspondant au partiel accroché, ici l'harmonique 4 a souvent une intensité plus faible par suite de la perte d'énergie due à l'accomodation de l'un sur l'autre. Dès que le régime normal est établi le son de bouche disparaît, mais il arrive qu'il coexiste avec le son du tuyau ce qui produit un timbre rauque, bruyant.

La qualité de l'attaque d'un tuyau dépend donc étroitement du son de bouche. S'il est très faible en intensité, le tuyau est long à s'établir. S'il est très intense et très riche en harmoniques, on entend à l'attaque du tuyau un grand nombre de sifflements qui persistent dans le son normal sous forme de grésillements. Si le son de bouche comporte beaucoup de bruit, on entend à l'attaque du tuyau une sorte de percussion brève.

Ces différents types d'attaque peuvent être appréciées comme "bonnes " ou " mauvaises " selon les esthétiques. Ainsi dans les jeux de bourdon, l'accrochage du partiel 2 ou 3 du tuyau par le son de bouche donne au timbre un caractère très particulier, souvent recherché par les facteurs d'orgue. Il est bien connu maintenant que l'attaque du son joue un rôle très important dans la perception du timbre. C'est un problème auquel se sont heurtés les fabricants d'orgues électroniques. L'oreille n'analyse pas en détail ces phénomènes très brefs mais la sensation globale du son; les spécialistes distinguent des différences très fines. On en trouve mille preuves dans les réalisations des harmonistes.

...../



Laissant pour une autre étude les problèmes que posent l'harmonisation d'un jeu puis d'un orgue, nous nous bornerons ici à l'harmonisation d'un tuyau, sujet déjà passablement compliqué.

4°) Réglage de la pression.

Soit un tuyau de taille moyenne. Enregistrons le son de bouche isolé et le son du tuyau pour trois pressions différentes dans la gravure. (Fig.11). Au fur et à mesure que l'on augmente la pression, la fréquence du tuyau augmente, et le spectre s'enrichit. L'attaque change considérablement.

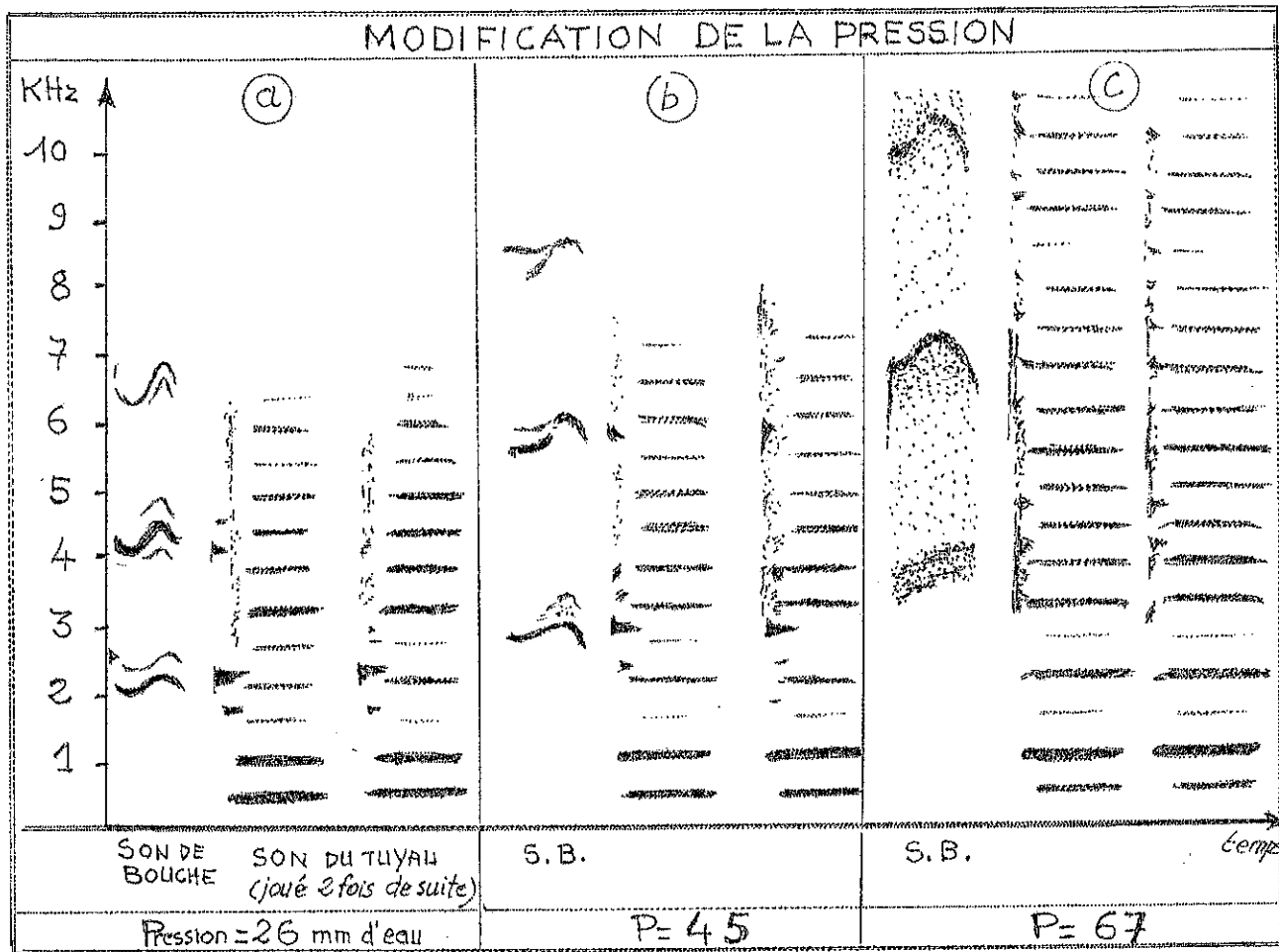


Figure 11

En (a) le son de bouche accroche le partiel 4 du tuyau. Il n'y a qu'une composante et pas de bruit d'attaque. C'est le fondamental du tuyau qui démarre le premier. En (b), le son de bouche est plus aigu, il accroche le partiel 5. Il est accompagné de nombreuses autres composantes. L'harmonique 2 du tuyau qui démarre le premier est le plus intense. La durée de l'attaque est aussi réduite de moitié. En (c) les fréquences du son de bouche sont devenues des bandes de bruit. Aucun partiel n'est nettement accroché. L'attaque, très brève (10 ms) se réduit à un spectre de bruit. Le tuyau a tendance à octavier; les harmoniques 2, 4, 6 sont prédominants. Tel quel, le tuyau parle au mieux pour la pression moyenne. Dans l'orgue, la pression est la même pour tous les tuyaux d'un sommier. Pour trouver la pression optimum convenant à chaque tuyau on agit sur le pied.

...../

5°) Rôle du pied

Dans les tuyaux d'étain, le pied a un double rôle.

a) former une lame d'air plane au niveau de la lumière.

Dans une flûte à bec l'air est conduit à la lumière par un "canal" parallépipédique et de 3 à 4 cm de longueur (fig.8). Pour des raisons pratiques il n'est pas possible d'adopter la même disposition dans un tuyau d'orgue en métal. On obtient cependant un résultat identique en réalisant un conduit cône d'une longueur suffisante, comme le montre l'expérience suivante.

- Expérience de raccourcissement du pied.

Un tuyau de taille moyenne, sonnante le LA₃ (440 Hz) possède un pied de 20 cm. On enregistre le tuyau normal et le son de bouche isolé puis on répète les mêmes opérations en réduisant le pied à 7,5 cm et à 1,5 cm. A chaque fois le tuyau est posé sur une plaque percée d'un trou de 4 mm afin de conserver constante la quantité d'air envoyée dans le tuyau.

La figure 12 montre le résultat des analyses dans les trois cas. Au fur et à mesure que l'on raccourcit le pied, le son du tuyau se dégrade.

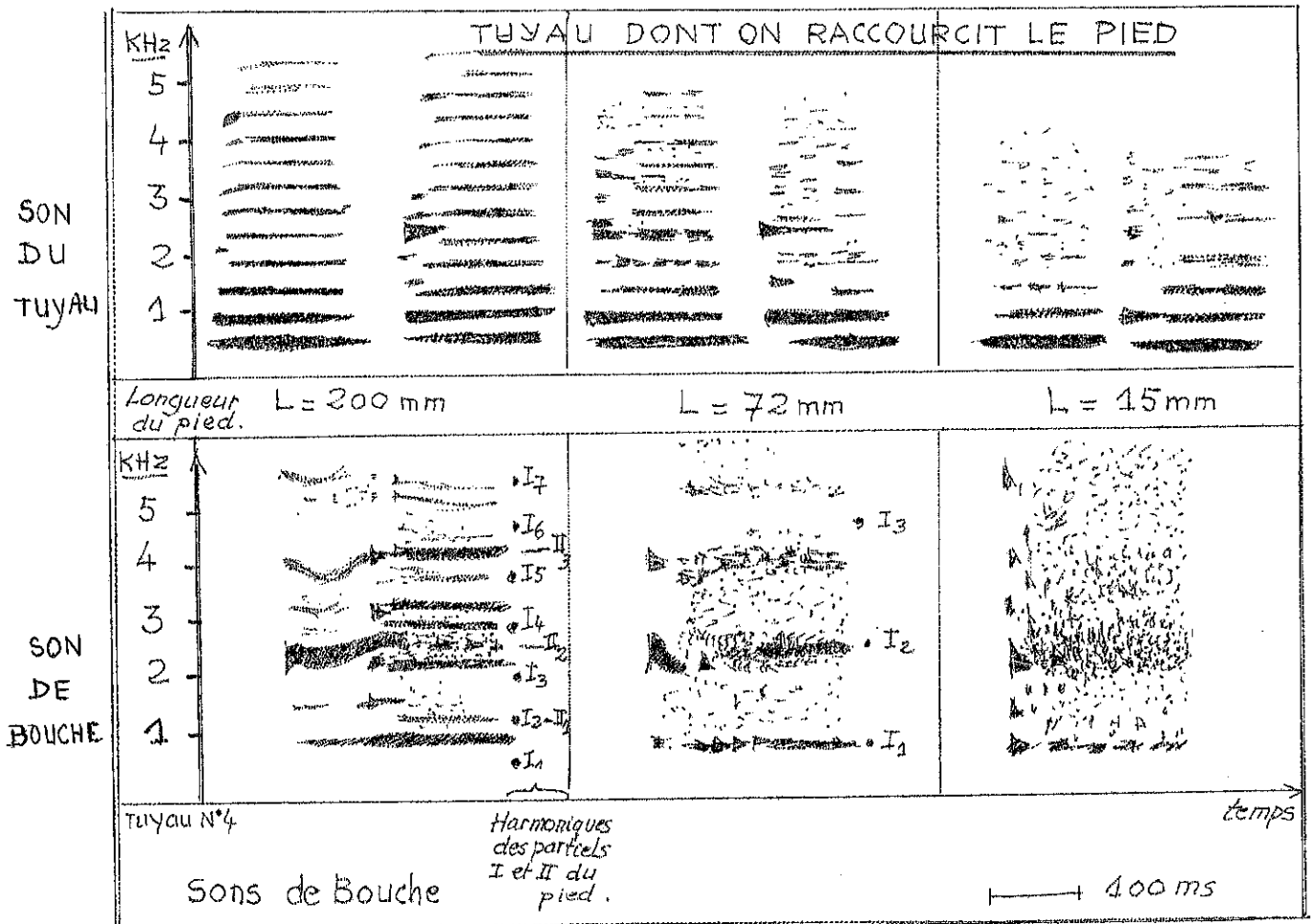


Figure 12

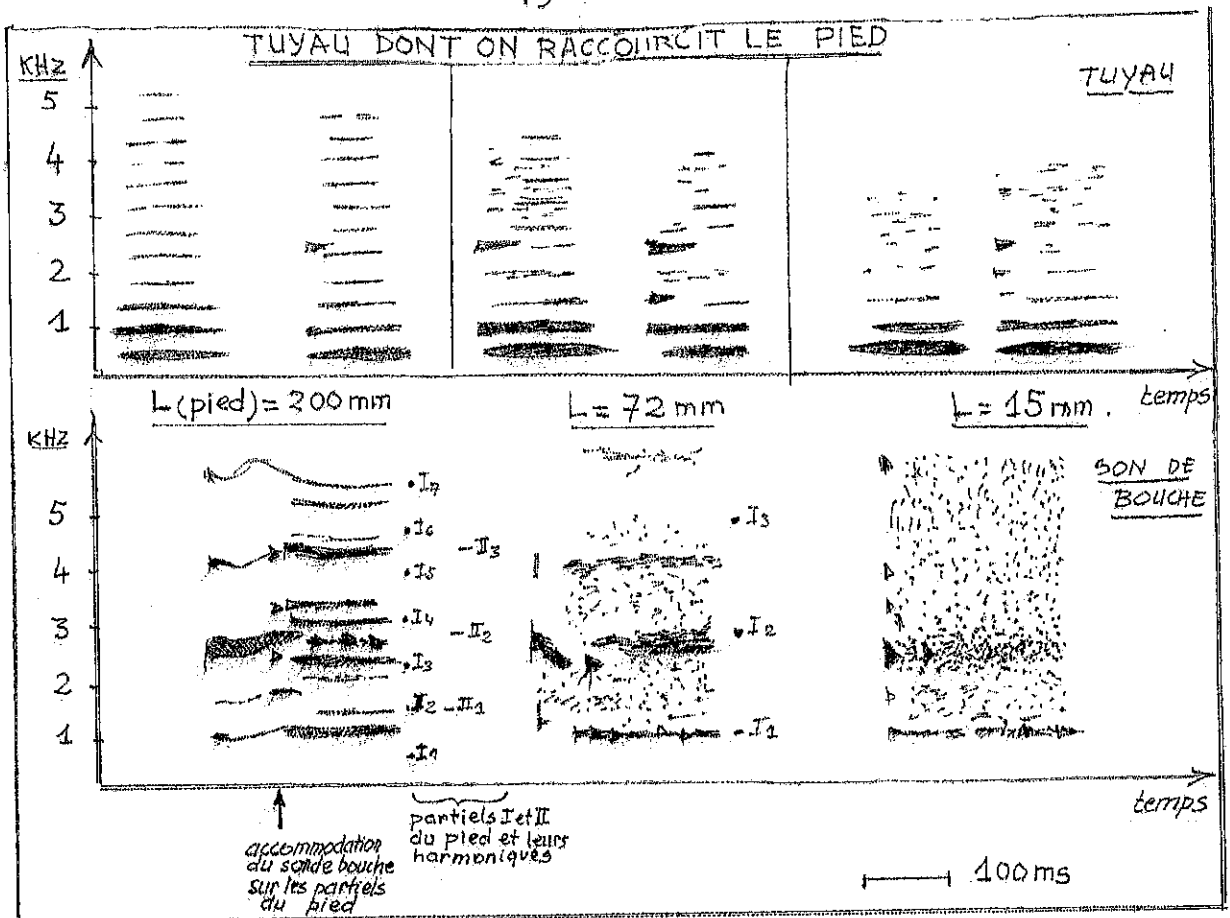


Figure 12

En (a) pour la longueur normale (20 cm) le son de bouche comporte de nombreuses composantes dont la deuxième, plus intense accroche le partiel 5 du tuyau. Celui-ci est riche en harmoniques; l'attaque est franche.

En (b), avec une longueur de pied de 7,5 cm, le son de bouche, réduit à deux composantes, renferme beaucoup de bruit que l'on retrouve dans le son du tuyau. Celui-ci est pauvre, instable et s'établit difficilement.

En (c), avec un pied de 1,5 cm, le son de bouche n'est plus qu'une bande de bruit. Le tuyau souffle péniblement et ne fournit plus que deux harmoniques.

Remarque : Le pied d'un tuyau d'orgue est un véritable tuyau sonore ouvert aux deux bouts, ayant ses propres partiels. On peut les relever en excitant l'ouverture inférieure du pied par une lame d'air sortant d'un ajutage après avoir rempli le tuyau proprement dit avec un chiffon. Lorsque l'on joue le son de bouche on note, au bout d'un temps très court une accommodation des fréquences du son de bouche sur les partiels du pied. Ce phénomène se voit très nettement sur la figure 12. Le temps d'accommodation varie avec la longueur du pied.

Dans le jeu normal du tuyau, le régime buccal est déjà terminé avant que se produise l'accommodation. Les partiels du pied ne doivent pas jouer de rôle sauf dans le cas où une des fréquences du son de bouche correspond exactement à un partiel du pied. Cette fréquence est alors considérablement renforcée, en intensité et en stabilité.

...../

En résumé, pour assurer le bon fonctionnement du tuyau le pied doit avoir une longueur minimum suffisante, qui s'est établie dans la pratique aux alentours de 20 cm.

En deuxième lieu le pied a pour rôle de :

b) Régler la vitesse de l'air à la sortie de la lumière.

Soit un tuyau dont l'extrémité supérieure est fermée, communiquant par un trou de section (o) avec un réservoir dans lequel on établit une certaine pression P (Fig. 13). On sait que la pression dans le tuyau est la même que dans le réservoir.

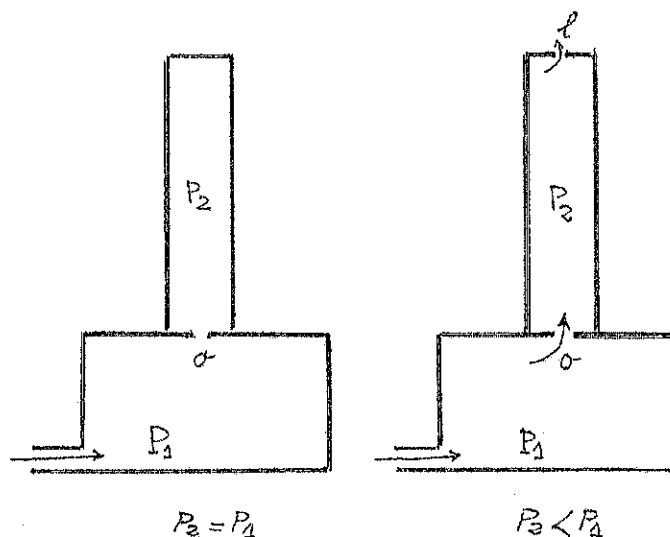


Figure 13

Dès que l'on perce un trou (l) à la partie supérieure du tuyau, les phénomènes sont complètement modifiés car il se produit un écoulement de l'air. Tant que (o) est plus petit que la section du tuyau, la pression dans le tuyau est toujours inférieure à celle du réservoir; sa valeur dépend du rapport l/o . (l) représente la lumière et (o) l'ouverture du pied.

Pour assurer le bon fonctionnement d'un tuyau d'orgue, il faut pouvoir régler indépendamment l'un de l'autre la quantité d'air sortant de la lumière qui va alimenter le tuyau (le débit) et la vitesse d'écoulement de cet air. La quantité d'air détermine l'intensité du son. La vitesse de l'air détermine la qualité du son et de petites variations de fréquence.

Quand la section (o) de l'ouverture du pied croît, la pression monte à l'intérieur du pied. A la sortie de la lumière la vitesse de l'air augmente et avec elle le débit.

Quand la section (l) de la lumière croît, la pression baisse à l'intérieur du pied; à la sortie de la lumière la vitesse de l'air diminue mais le débit ne diminue pas par suite de l'accroissement de section.

On voit qu'en agissant sur la lumière on obtient des effets plus compliqués qu'en agissant sur l'ouverture du pied. On utilise l'une ou l'autre opération selon les cas.

...../

Préons l'exemple d'un tuyau sur le point d'octavier parce que la pression est trop forte (fig.14).

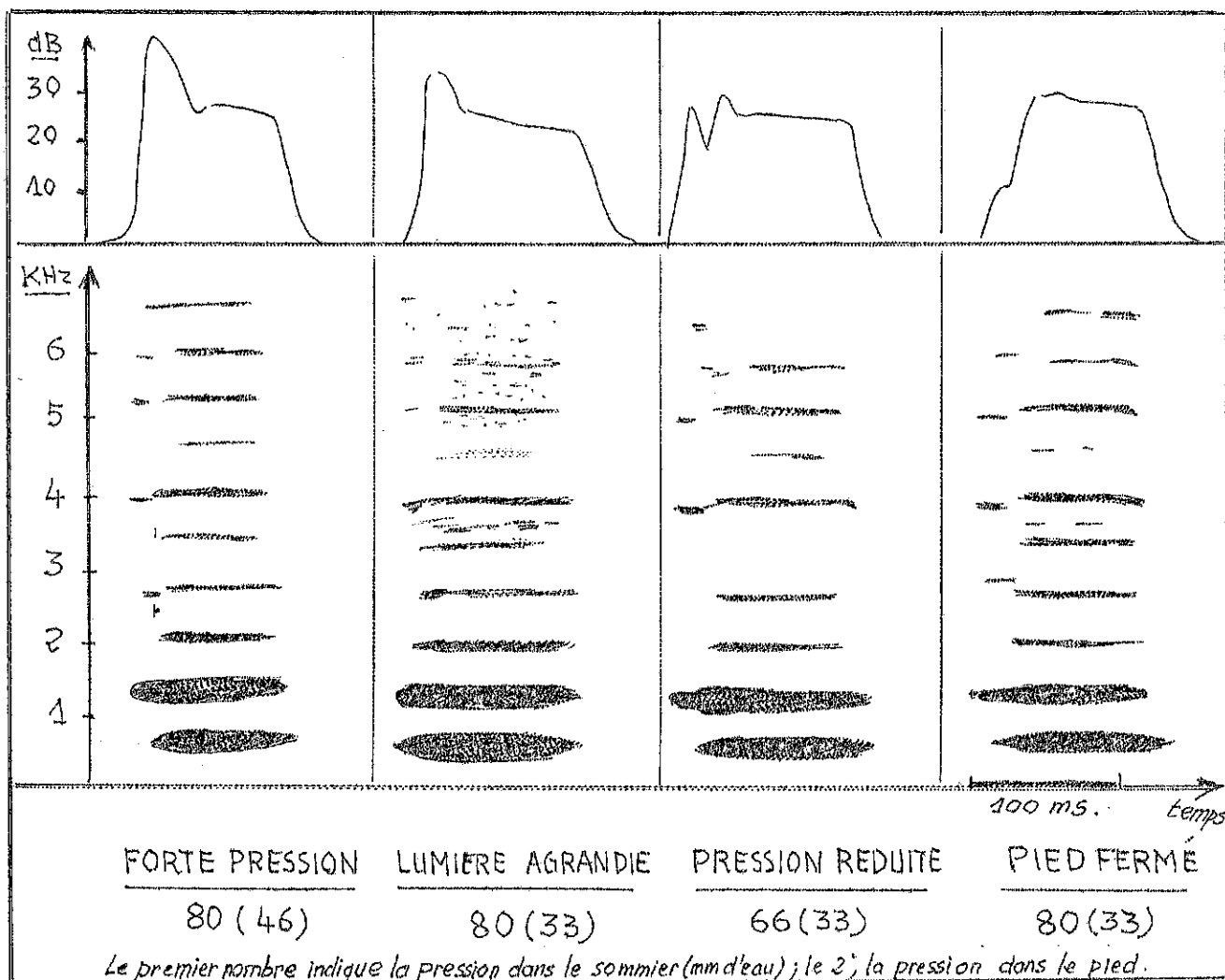


Figure 14

La pression dans le sommier restant inchangée (80 mm d'eau) on ramène la pression dans le pied de 46 à 33 mm d'eau tout d'abord en fermant le pied, puis celui-ci étant remis à l'état antérieur, en agrandissant la lumière.

Fermer le pied revient pratiquement à baisser la pression dans le sommier comme le montre la comparaison des deux analyses. L'intensité du son est plus faible mais l'attaque est molle, les harmoniques supérieurs apparaissant avec un retard notable. Le régime buccal dure bien 30 ms. Bien que l'intensité de l'harmonique 2 ait diminué, la sensation d'octavation n'a pas disparu car le fondamental a toujours un très grand retard sur celui-ci.

Si on agrandit la lumière, le retard du fondamental diminue nettement; les sons de bouche ont disparu et l'attaque est nette. En revanche il y a un peu de bruit d'écoulement mais celui-ci disparaît à quelques mètres.

Le choix de l'une ou l'autre des solutions dépend de la qualité de son que l'on veut obtenir. Grâce à une pratique suffisante l'harmoniste sait immédiatement à l'audition du tuyau, quelle action il convient d'entreprendre.

...../

Il est un choix sur lequel les facteurs d'orgue sont partagés. On peut obtenir la même pression dans le pied du tuyau soit avec une forte pression dans la gravure et un pied très fermé, soit avec une faible pression dans la gravure et le pied grand ouvert. (Cette dernière solution porte le nom de " plein vent ".)

Or il importe de choisir au départ quel parti on va suivre, car de la pression adoptée dépendent un certain nombre de dispositions de l'orgue, et puis le résultat esthétique n'est pas le même. Voici une expérience.

Un tuyau dont le pied a 3,1 mm de diamètre à l'ouverture, parle bien pour une pression de 21 mm d'eau dans le pied. La pression dans la gravure est de 67 mm. Toutes choses égales par ailleurs, on ouvre complètement le pied du tuyau (8 mm de diamètre). Il faut alors ramener à 22 mm la pression de la gravure afin que la pression dans le pied soit la même. Or le résultat sonore varie considérablement, surtout au moment de l'attaque du son (fig. 15).

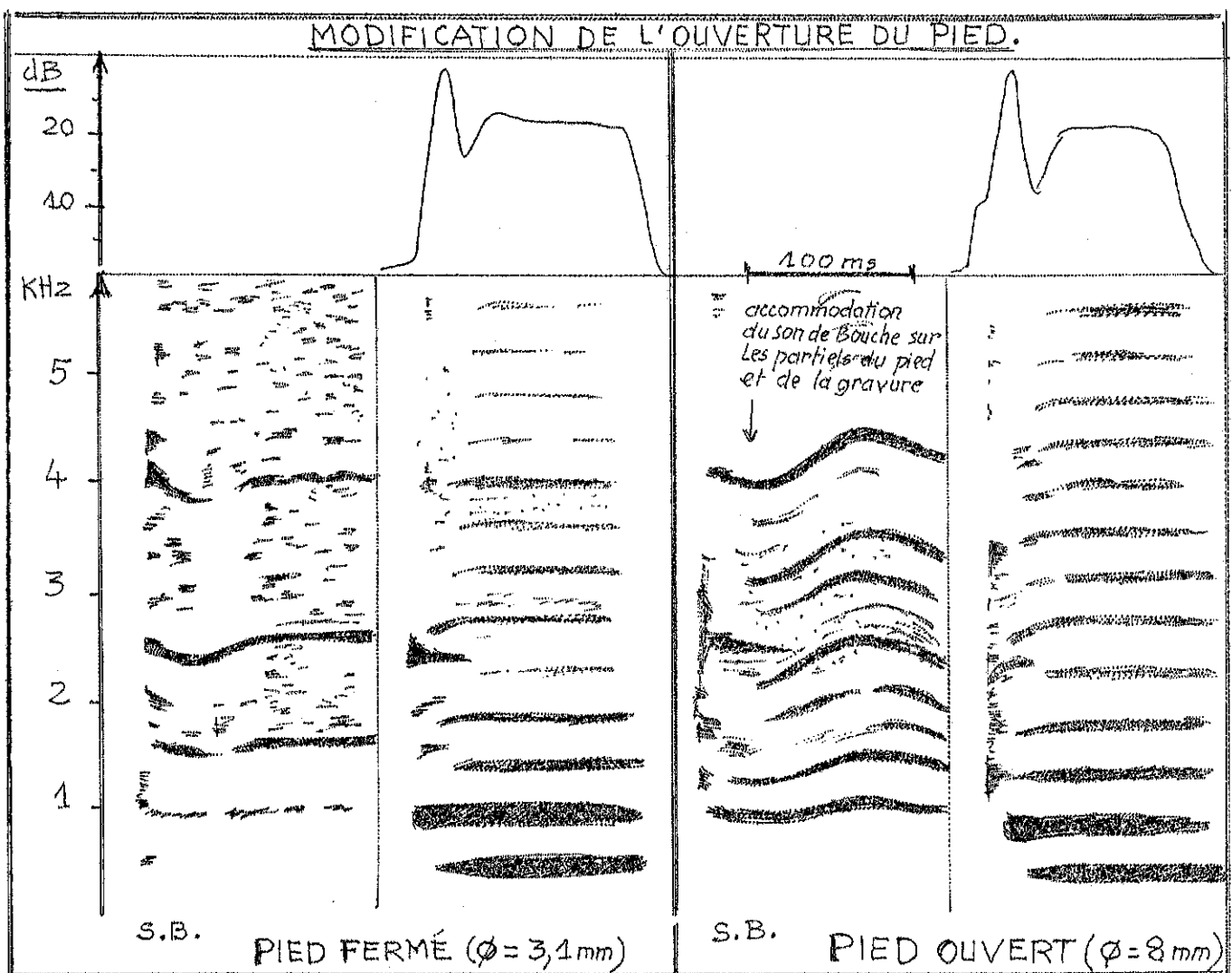


Figure 15

On voit qu'il se produit un accrochage du partiel 5 du tuyau fermé. L'accrochage du partiel 5 par le son de bouche produit un petit sifflement caractéristique, avant l'attaque du son du tuyau proprement dit. D'autre part le son de bouche comporte une part notable de bruit d'écoulement dû aux tourbillons se formant à l'ouverture étroite du pied, bruit que l'on retrouve dans le son normal du tuyau.

...../

pied ouvert - A l'oreille, l'attaque du son du tuyau paraît franche et nette. On voit sur le sonagramme un petit trait vertical : c'est une bande de bruit de 1 à 2 ms que l'on retrouve à l'attaque du son de bouche isolé. Celui-ci comporte au début les mêmes fréquences que lorsque le pied est fermé, puis au bout de 50 ms on en voit apparaître un grand nombre d'autres; provenant de la réaction des partiels du pied et de la gravure.

En effet, la vibration périodique produite au niveau de la lumière et par suite, dans le pied, se communique à la gravure lorsque l'ouverture du pied est suffisante (Bib. 4 p.229). Donc l'air de la gravure vibre, et réagit à son tour sur le son de bouche, et même sur la composition harmonique du tuyau. Le son du tuyau change selon la place qu'il occupe sur la gravure. Lorsque plusieurs tuyaux parlent ensemble sur une gravure, il se produit donc des réactions réciproques d'une très grande complexité qui posent souvent des problèmes difficiles à l'harmoniste et sont sans doute à l'origine de l'abandon du " plein vent " par un certain nombre de facteurs.

En résumé, chacune des deux solutions présente des avantages et des inconvénients. Lorsqu'on choisit le plein vent :

- la pression nécessaire est plus faible (moindre dépense d'énergie).
- l'harmonisation est beaucoup plus délicate car d'une part on se prive d'un moyen de réglage, (l'ouverture du pied) et d'autre part il faut tenir compte des réactions de la gravure et des tuyaux les uns sur les autres.
- En revanche l'orgue a une sonorité particulière due à l'attaque franche des tuyaux, à leur grande richesse en harmoniques aigus, à leur fusion plus intime. Enfin, du fait de la pression plus faible, les moindres fluctuations de pressions sont perceptibles et donnent au son du tuyau une légère instabilité en fréquence, qui, bien dosée, donne de la vie au son.

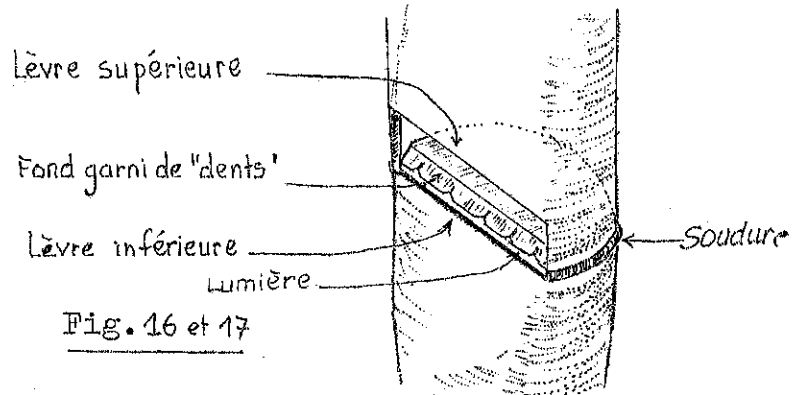
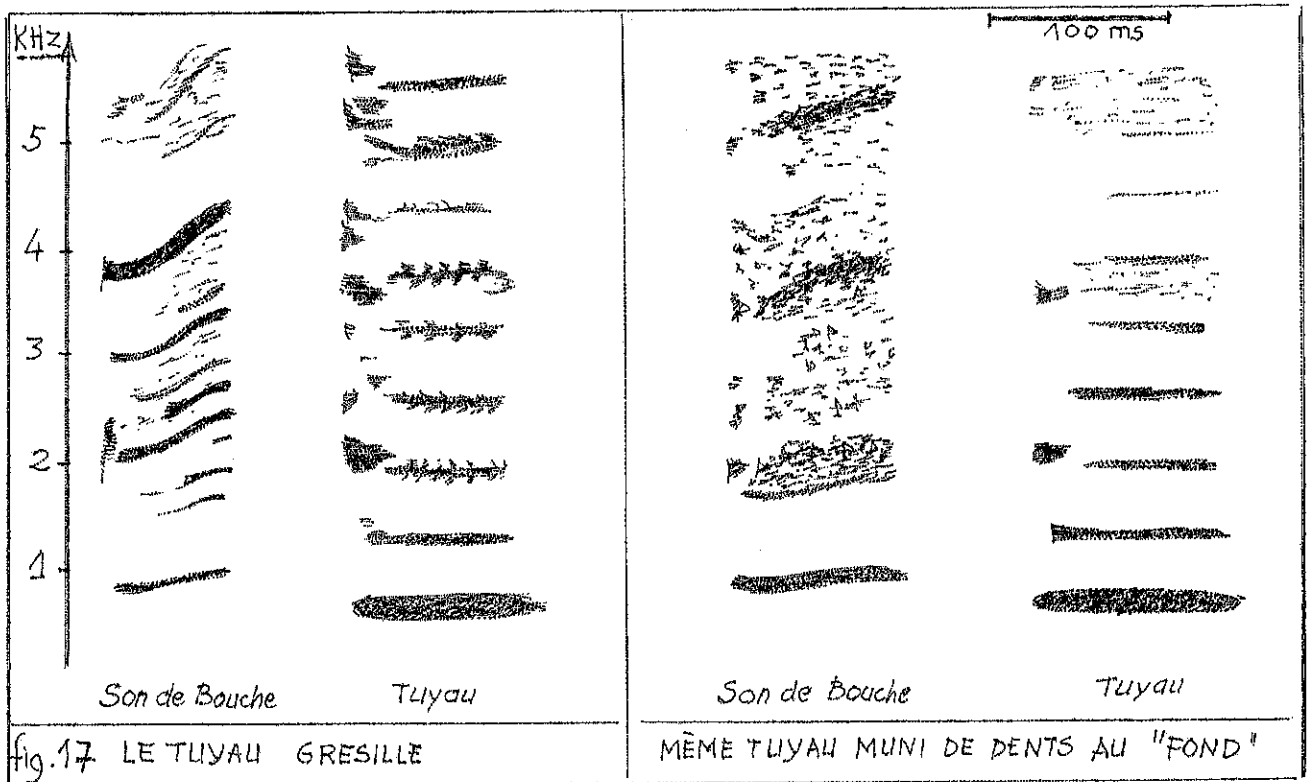
6°) Forme de la lumière

La forme du jet d'air qui sort de la lumière dépend étroitement de la forme de la lumière et en particulier de l'état des arêtes du fond et de la lèvre inférieure.

Lorsqu'on taille la bouche pour faire parler le tuyau ces arêtes sont très vives, tranchantes et le son de bouche correspondant est riche en fréquences aiguës; le tuyau " grésille ". Il est d'usage d'émousser le plan incliné du fond (fig.16) en pratiquant de petites entailles appelées "dents ". La forme, le nombre, l'emplacement, la profondeur de ces dents varie selon les styles d'harmonisation. Dans l'expériences que nous avons faite, nous avons exagéré les phénomènes afin de mieux les mettre en évidence.

On voit, fig. 17 le son de bouche et le son du tuyau, avant et après l'application de dents. Les différences sont considérables, aussi bien dans l'attaque que dans le spectre du tuyau. Lorsque la lumière est bien nette, le son de bouche, intense, comporte un très grand nombre de fréquences. On les retrouve, accompagnées de bruit, à l'attaque du tuyau; elles produisent des battements avec les harmoniques du tuyau. Le son est riche, mais instable; le tuyau grésille. Lorsque la lumière est garnie de dents, le

...../



jet d'air s'écoule suivant des vitesses différentes, par suite des frottements plus ou moins importants; il se forme des enroulements, des tourbillons qui s'opposent à la production de fréquences aiguës stables. Dans le son de bouche, ceci se traduit, par le renforcement du régime 1, les autres étant plus ou moins transformés en bandes de bruits que l'on retrouve dans le son du tuyau. En conséquence, le tuyau a une attaque plus sûre mais qui, a distance, paraît un peu molle. Le fondamental est renforcé en intensité et les harmoniques sont bien stables. En revanche, la perte des harmoniques aigus et le renforcement du fondamental font que; la sonorité du tuyau est sourde, terne. Selon l'expression de M. WOLFF, harmoniste chez MUHLEISEN " le tuyau a perdu la vie; il est mort ".

Comme pour toutes les opérations d'harmonisation, il faut donc avoir la main légère.... et selon les cas, savoir émusser l'arête inférieure ou supérieure du fond, juste de la quantité nécessaire. A cette partie, une altération à peine visible à l'oeil produit déjà des changements de timbre perceptible. Surtout pour les tuyaux de 4, 2 et 1 pied (DO 2 à SI 4) pour lesquels les harmoniques et les bruits d'attaque sont placés dans la zone sensible de l'oreille (500 à 5000 Hz).

La texture du matériau du tuyau a donc un rôle déterminant au niveau de la lumière. Selon qu'il est lisse, rugueux, fibreux,

...../

granuleux, le résultat sonore sera différent, toutes choses égales par ailleurs. Nous reviendrons plus loin sur le problème du matériau.

Dans la liaison du son de bouche et du tuyau, l'orientation de la lame d'air par rapport au biseau (lèvre supérieure) joue un rôle fondamental. L'harmoniste dispose de deux moyens de réglage différents.

7°) Orientation de la lèvre supérieure.

L'opération est simple, et consiste à avancer plus ou moins la lèvre supérieure, à l'aide d'un outil approprié. Quand la lèvre supérieure est tout à fait rentrée, la lame d'air passe à l'extérieur du tuyau. Il n'y a pas de son. Sortons la légèrement, le tuyau commence à parler (fig. 18a).

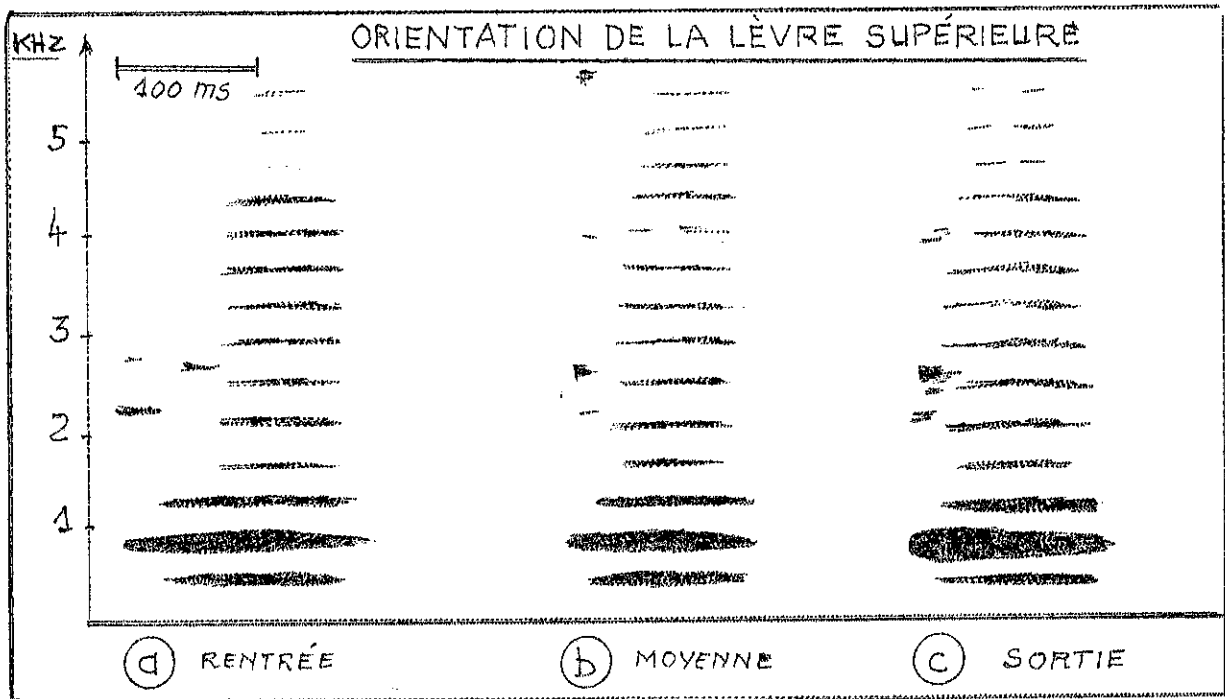


Figure 18

Le timbre est riche, mais l'attaque du son dure très longtemps : 1/10 de s. sur la figure; le tuyau est " tardif ", car il n'a pas assez d'air. Sortons un peu plus la lèvre supérieure, l'attaque se fait plus franche et plus rapide (Fig. 18 b). Si nous exagérons le mouvement (Fig. 18 c) le tuyau a tendance à octavier. Un " vent " trop important le fait passer au régime 2.

On peut constater sur la figure, que, à l'exception de l'harmonique 2, le timbre n'a pas changé. C'est principalement la durée de l'attaque qui est affectée.

8°) Orientation du fond (biseau des organiers)

Cette opération est plus complexe et d'autre part plus délicate à expérimenter. Il s'agit de monter ou descendre légèrement le fond. Celui-ci est soudé au tuyau sur sa circonférence mais les propriétés de l'étain permettent de produire de petites déformations. Selon le résultat désiré, on tape ou on appuie fortement d'un côté

ou de l'autre, et en répartissant les forces bien régulièrement sur tout le pourtour. Il faut faire bien attention à ne pas toucher aux bords de la lumière.

Là aussi les moindres modifications sont perceptibles, et il faut avoir la main très légère.... En fait, lorsqu'on touche au fond, on produit des effets compliqués : le changement d'orientation du fond agit non seulement sur la quantité d'air qui entre dans le tuyau mais aussi sur la forme de la lumière; or nous venons de voir que celle-ci est déterminante dans la qualité du son.

La figure 19 montre l'analyse pour trois positions du fond : haut, moyen et bas.

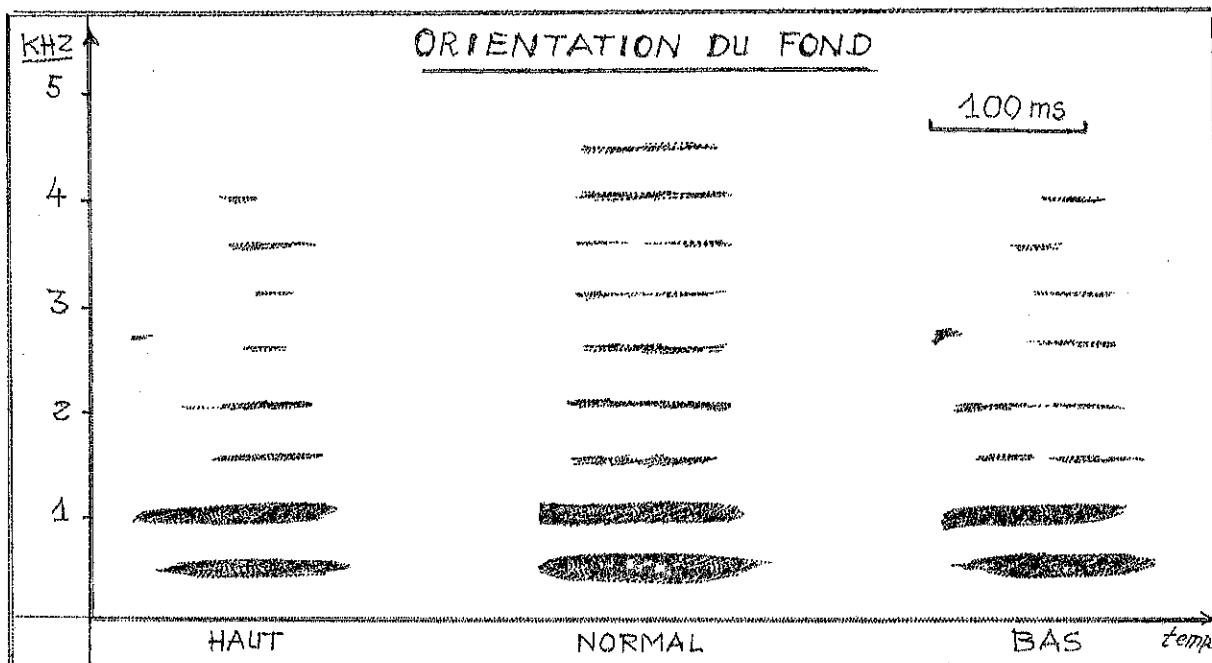


Figure 19

Quand le fond est haut, la lame d'air est dirigée vers l'extérieur du tuyau : le tuyau ne parle pas ou est tardif. Inversement pour le fond trop bas, la lame d'air entre trop dans le tuyau qui a tendance à octaviser (harmonique 2 intense tout au début de l'attaque). Le timbre du tuyau s'est appauvri considérablement dès que l'on a touché au fond pour le monter ou le descendre. La lumière a sans doute été atteinte au cours des opérations.

9°) Rôle de l'égueulement

On désigne par ce nom l'opération qui consiste à recouper la lèvre supérieure pour augmenter la hauteur de bouche. Dans un jeu donné, la hauteur, la largeur de bouche, le diamètre du tuyau ont entre eux certaines proportions caractéristiques qui d'ailleurs ne sont pas fixes mais évoluent suivant la tessiture. Lorsqu'un tuyau octavie obstinément ou lorsque les caractéristiques acoustiques du local l'exigent, l'harmoniste peut être amené à recouper la hauteur de bouche. Il ne le fait que prudemment car l'égueulement agit sur plusieurs facteurs simultanément et on ne peut plus revenir en arrière.

Quand on égueule un tuyau :

- la fréquence fondamentale monte par suite de l'accroissement du

..../

rapport s/5

- Le son de bouche baisse (augmentation de la distance lumière-biseau) et devient plus faible en intensité, ce qui entraîne des modifications importantes du régime buccal (attaque plus molle et plus floue); de son côté, le timbre du son est altéré (renforcement du fondamental, perte d'harmoniques aigus).

Ces modifications sont bien visibles sur les analyses reproduites figure 20.

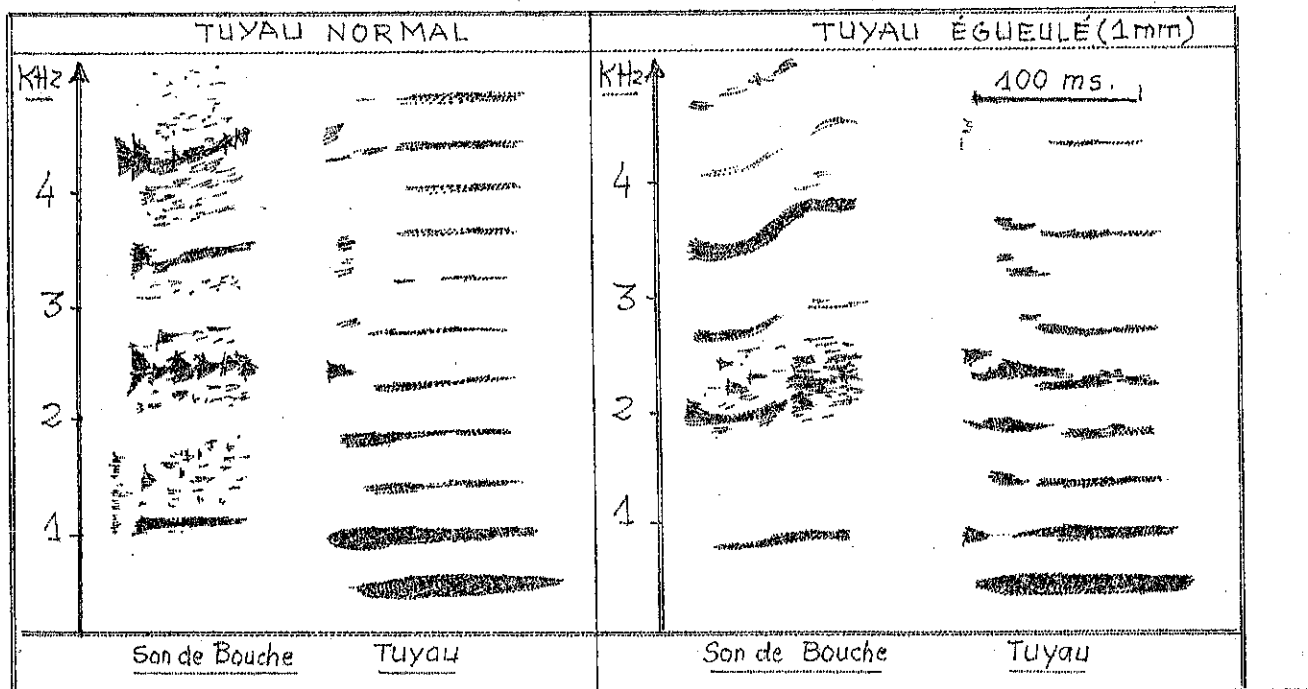


Figure 20.

On peut rattraper le tuyau en montant la pression (ouverture du pied mais la fréquence fondamentale augmente encore et ceci n'est possible que lorsque le tuyau était auparavant trop bas.

10°) Rôle de certains accessoires de la bouche

a) Les oreilles. Ce sont deux petites plaques d'étain soudées sur les bords latéraux de la bouche perpendiculairement au plan de la bouche (Voir pl. I). On peut les rapprocher plus ou moins pour régler :

- la hauteur fondamentale du tuyau. En rapprochant les oreilles on réduit le " domaine " de la bouche, donc la fréquence baisse, la marge de réglage est de l'ordre du 1/4 de ton.
- Le rapport des fréquences entre les partiels 1 et 2 donc le timbre du son. Prenons par exemple un tuyau à cheminée parlant sous un vent assez fort et près de quintoyer. Le partiel 2 (la douzième dans un tuyau bouché) n'a pas exactement la même fréquence que l'harmonique 3 du partiel 1 et l'on entend des battements entre ceux-ci et leurs harmoniques respectifs, comme le montre le sonagramme de la figure 21.

Lorsque l'on rapproche les oreilles, le partiel 1 est abaissé en fréquence d'une plus grande quantité que le partiel 2; on peut donc accorder les deux partiels l'un sur l'autre de façon à

...../

faire disparaître les battements. C'est ce qui s'est produit fig. 21 pour une certaine position des oreilles, le son est devenu brusquement stable et paraissait beaucoup plus riche. Corrélativement, l'intensité des harmoniques s'est modifiée.

Les tuyaux bouchés d'étain sont généralement munis d'oreilles.

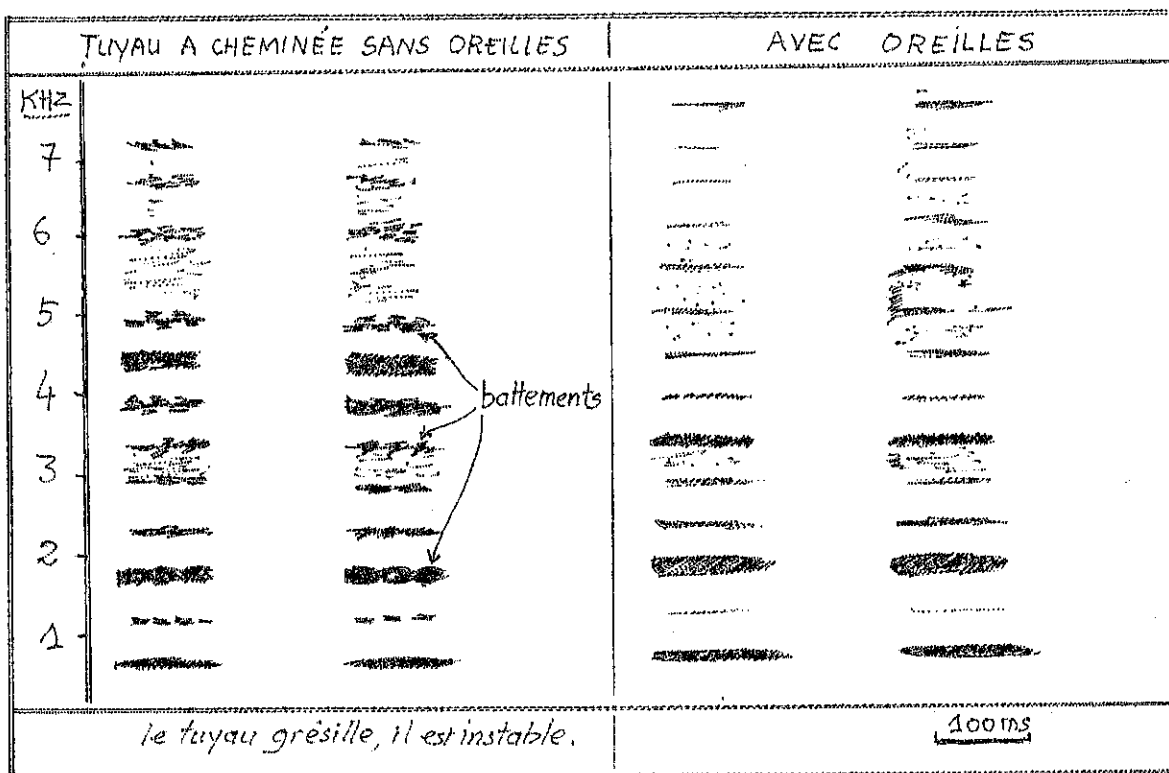


Figure 21

b) Le rouleau. Certains tuyaux de taille fine dont la bouche est basse, (gambé, salicional) sont difficiles à harmoniser, car si l'on veut une attaque franche, ils ont tendance à octavier. Pour éviter cet inconvénient on leur adjoint un rouleau. C'est un petit cylindre de métal que l'on place devant la bouche, à hauteur du fond Fig. 22 a.

Pour comprendre le rôle du rouleau, faisons l'expérience suivante. Un tuyau ouvert étant placé sur la gravure, augmentons progressivement la pression du vent. La fréquence du tuyau monte. A un certain point, vers 70 mm d'eau par exemple, le son devient instable puis, vers 90 mm d'eau, il saute au régime 2, c'est-à-dire il octavie.

Recommençons la même expérience avec le tuyau muni d'un rouleau. A 70 mm le tuyau est encore parfaitement stable, vers 100 mm on entend quelques altérations du son; le tuyau octavie que vers 125 mm d'eau. Ces valeurs varient selon la position du rouleau, mais en règle générale, le rouleau permet d'augmenter la marge de stabilité en pression du régime 1 : le réglage du tuyau en est facilité. Pour éviter l'octaviation, on aurait pu baisser la pression dans le pied, par réduction de son ouverture, mais ceci aurait entraîné une baisse d'intensité et une perte d'harmoniques aigus.

Si nous faisons l'analyse au sonographe d'un tuyau près d'octavier avec et sans rouleau, nous constatons (fig. 22 b) dans les 2 cas que l'attaque est fort différente. Sans rouleau, l'harmonique 2 apparaît le premier et a dès les premières millisecondes une très

...../

forte intensité. Le fondamental ne s'établit que très progressivement, et n'atteint son intensité maximum, inférieure à celle de l'harmonique 2 qu'au bout de 100 ms. Avec le rouleau, l'harmonique 1 n'a plus que 5 ms de retard à l'attaque et son intensité est comparable à celle de l'harmonique 2 qui s'est affaibli. Le contenu en harmoniques aigus est resté pratiquement inchangé.

La place du rouleau est assez critique; l'idéal est de pouvoir le régler en hauteur et en profondeur (distance à la bouche).

VI - ROLE DU MATERIAU

C'est à dessein que nous avons placé ce chapitre à la fin. En effet, tout ce qui précède était nécessaire pour éclairer un certain nombre de résultats apparemment contradictoires obtenus par les chercheurs, relativement au rôle du matériau dans les tuyaux sonores (Bib.5, p. 41-49 et Bib. 13). On comprend bien pourquoi il est impossible de comparer un tuyau en étain et un tuyau en zinc pour la simple raison qu'on ne peut matériellement faire deux bouches strictement identiques. Or, nous le savons des différences invisibles dans les bouches, à l'oeil nu, produisent des altérations du son fort perceptibles à l'oreille, surtout dans les phénomènes d'attaque du son. On risque alors d'attribuer au matériau ce qui provient de la facture de la bouche. On pourrait s'en tirer en comparant statistiquement un jeu complet (56 tuyaux) d'étain et une copie la plus fidèle possible en zinc, en cuivre etc... L'expérience est longue, coûteuse et ne peut être faite que par un excellent harmoniste. Encore faut-il qu'il travaille non à l'oreille mais au pied à coulisse ! S'il y avait alors une différence nette de sonorité, on pourrait raisonnablement l'attribuer au matériau. Finalement le matériau intervient de diverses façons dans la qualité du son. Deux points principaux sont à considérer :

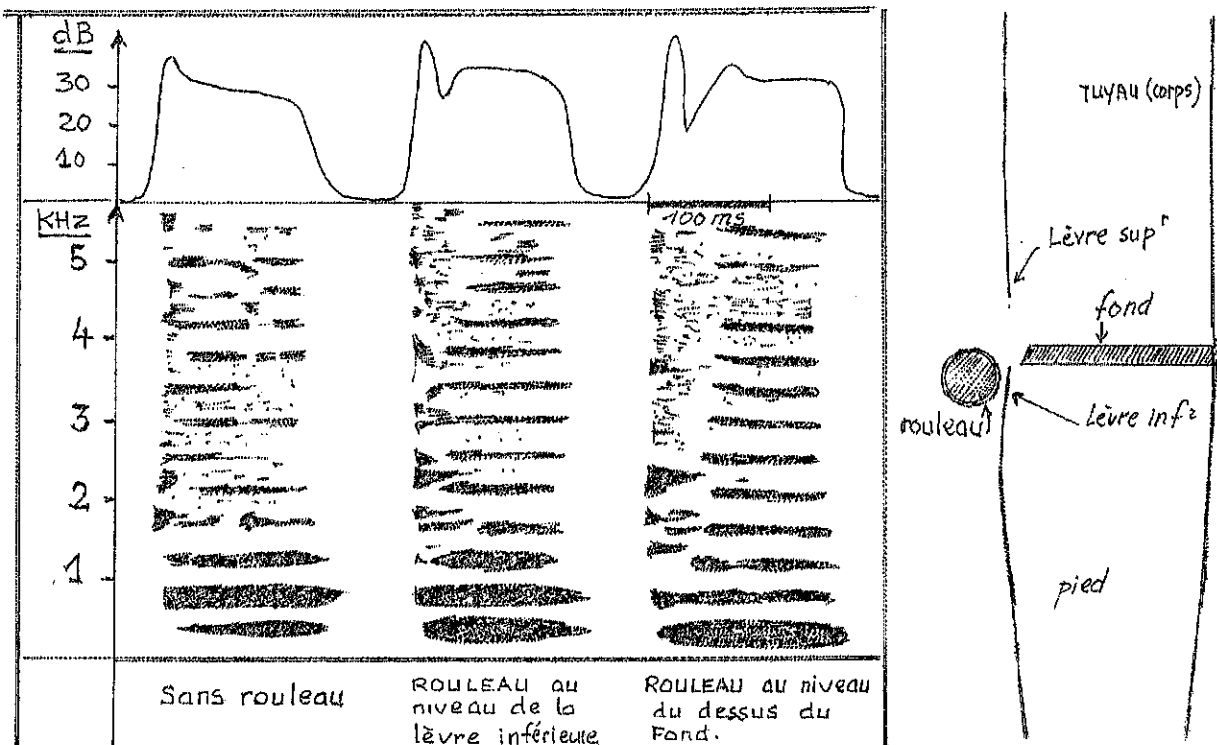


Figure 22

1°) LA VIBRATION DES PAROIS.

Quand un tuyau normal sonne, les parois vibrent : le phénomène est perceptible au toucher, surtout au milieu du tuyau où se situe le " ventre de pression ", c'est-à-dire, des variations de pression qui agissent nécessairement sur les parois. Si celles-ci sont minces elles vibrent à leur tour et rayonnent de l'énergie acoustique par leur surface externe. Le tuyau vibrant est donc susceptible de réagir à son tour sur l'onde stationnaire elle même. En fait il faut considérer les rapports d'énergie des deux phénomènes. Sur un tuyau d'étain d'un pied (32 cm, environ 500 Hz) dont l'épaisseur de la paroi est de 1 mm on place un accéléromètre, sorte de micro de contact, insensible aux ondes aériennes. On mesure l'intensité du courant recueilli que l'on compare à celle du son du tuyau enregistré simultanément sur magnétophone. La vibration de la paroi existe bien mais est beaucoup plus faible que le son aérien. Dans ces conditions il est difficile de conclure à une réaction perceptible des parois sur l'onde stationnaire contenue dans le tuyau. Il n'en est pas de même avec des parois très déformables). Pour le montrer nous avons repris une expérience faite par SAVART et citée par BOUASSE (Bib. 3 p. 223).

Soit un tuyau d'orgue ouvert dont on relève la fréquence et le spectre sonographique. On coupe alors le tuyau environ 1,5 cm au-dessus de la lèvres supérieure, pour le remplacer par un tuyau de papier calque de même longueur et de même diamètre intérieur. Le tuyau étant replacé sur le sommier on vérifie immédiatement que la fréquence a changé. Selon le papier utilisé elle baisse d'un ton ou deux; quelquefois elle monte... De plus elle varie d'une tierce ou plus selon l'endroit où on touche le tuyau, ce qui présenterait bien des inconvénients pour l'harmonisation. L'attaque du son est très longue, de l'ordre du 1/10 de seconde car l'onde stationnaire met du temps à s'accommoder avec le tuyau. Enfin le contenu harmonique, relativement pauvre (5 harmoniques) s'accompagne d'une assez grande quantité de bruits, le papier vibrant comme une membrane (fig.23)

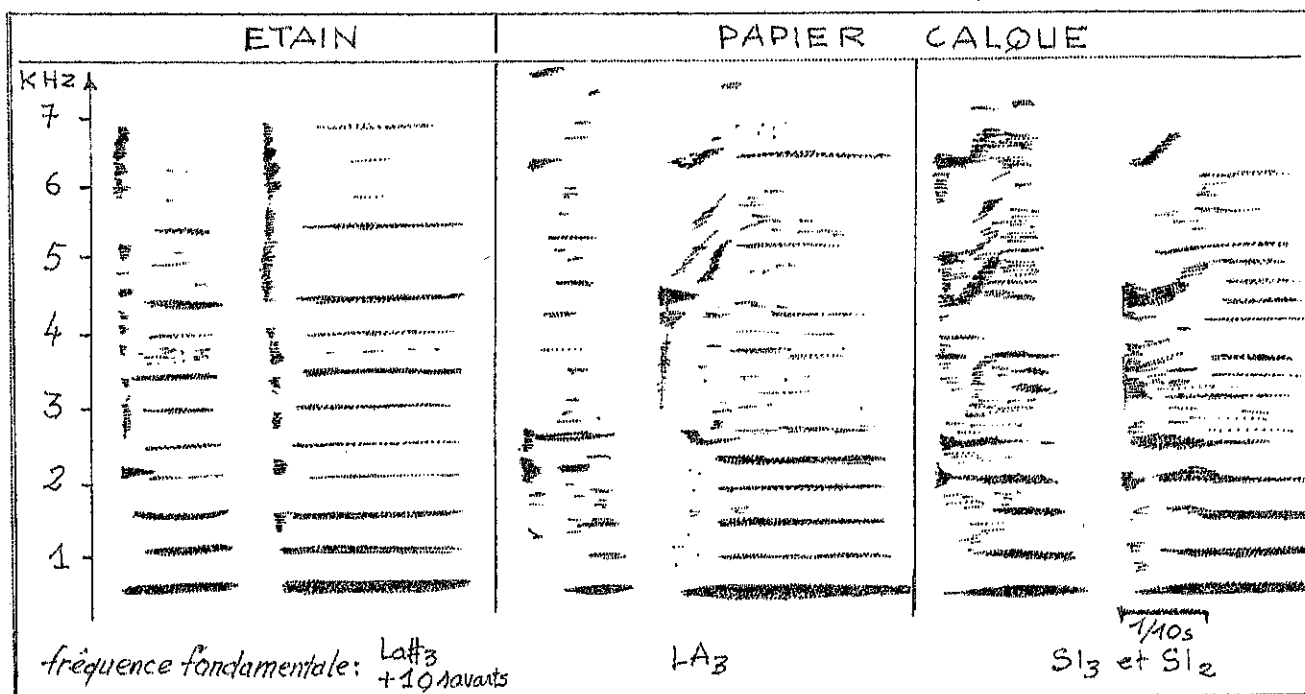


Figure 23

...../

Dans son expérience, SAVART n'avait noté que la baisse de fréquence du fondamental qu'il trouvait inversement proportionnelle à l'épaisseur de la paroi mais il ne signalait pas de modification du timbre. Ce genre d'expérience est difficilement reproductible. Un simple changement dans la quantité de colle utilisée pour le cylindre de papier modifie la raideur de la paroi et de ce fait, les résultats sont différents d'une expérience à l'autre.

En conclusion, pour des raisons de stabilité en fréquence, de qualité du son, il est souhaitable que les parois ne vibrent pas de façon notable. Le matériau classique des tuyaux d'orgue : alliage d'étain et de plomb est tout à fait approprié à son usage. En effet, indépendamment de ses qualités fondamentales de malléabilité et de rigidité suffisante, il présente une inertie suffisante pour empêcher les réactions des parois sur l'onde stationnaire.

2°) RÔLE DE L'ÉTAT DE SURFACE DU MATÉRIAU.

a) L'amortissement intérieur du tuyau
Il détermine le "rendement" du tuyau. En effet, l'onde stationnaire est d'autant plus énergique et s'établit d'autant mieux que les parois internes du tuyau présentent moins de frottements. Les fabricant d'instruments à vent le savent bien : la surface interne d'une clarinette classique est polie comme un miroir. Les flûtes japonaises sont laquées à l'intérieur etc... Ces pratiques sont donc tout à fait justifiées et nous avons voulu le vérifier par l'expérience.

Nous avons utilisé quatre tuyaux ouverts de dimensions moyennes (20 à 30 cm) en étain. Les tuyaux sont joués et enregistrés puis on protège par un scotch la lumière et la lèvres supérieure et on enduit l'intérieur des tuyaux d'une colle faite d'un peu de farine diluée dans de l'eau. Avant séchage on projette dans le tuyau un peu de sciure de bois fine qui reste ainsi fixée à la paroi intérieure et lui donne un aspect tout à fait rugueux. Cette préparation offre l'avantage de se nettoyer par simple lavage à l'eau ce qui permet de vérifier en rejouant les tuyaux ultérieurement que l'on a pas modifié l'harmonisation au cours des manipulations. Les résultats sont très nets. Avec les tuyaux enduits, on constate simultanément une baisse notable, de la fréquence de l'ordre de 5 savarts (un comma) et une chute d'intensité d'environ 3 dB. D'autre part l'analyse au sonographe révèle (fig.24) une perte d'intensité dans les harmoniques aigus (le son est sourd) et une augmentation importante de la durée de l'attaque, les harmoniques aigus ayant le plus de retard. Dans cette expérience, on a intentionnellement grossi les phénomènes afin de mieux les mettre en évidence, mais on retrouve les mêmes résultats dans la réalité, à une autre échelle. C'est le cas des altérations du métal (lèpre de l'étain) qui rendent sa surface rugueuse et surtout de l'empoussiérement des tuyaux. La poussière se dépose d'ailleurs, non seulement à l'intérieur des tuyaux mais aussi à la bouche et son action sur le timbre est donc multiple.

b) Etat des arêtes de la lumière.

Nous avons déjà parlé de ce problème à propos des dents. L'expérimentation en ce domaine est très délicate, du fait de l'échelle microscopique des phénomènes. Le dépôt de poussière au niveau de la lumière provoque une diminution du débit et altère le son de biseau, ce qui aboutit à une perte des fréquences aiguës, et à une augmentation des bruits d'écoulement. Une tradition veut que l'orgue "se fasse" avec le temps; c'est plutôt la poussière qui "fait"

l'orgue en se déposant sur les arêtes vives de la lumière.

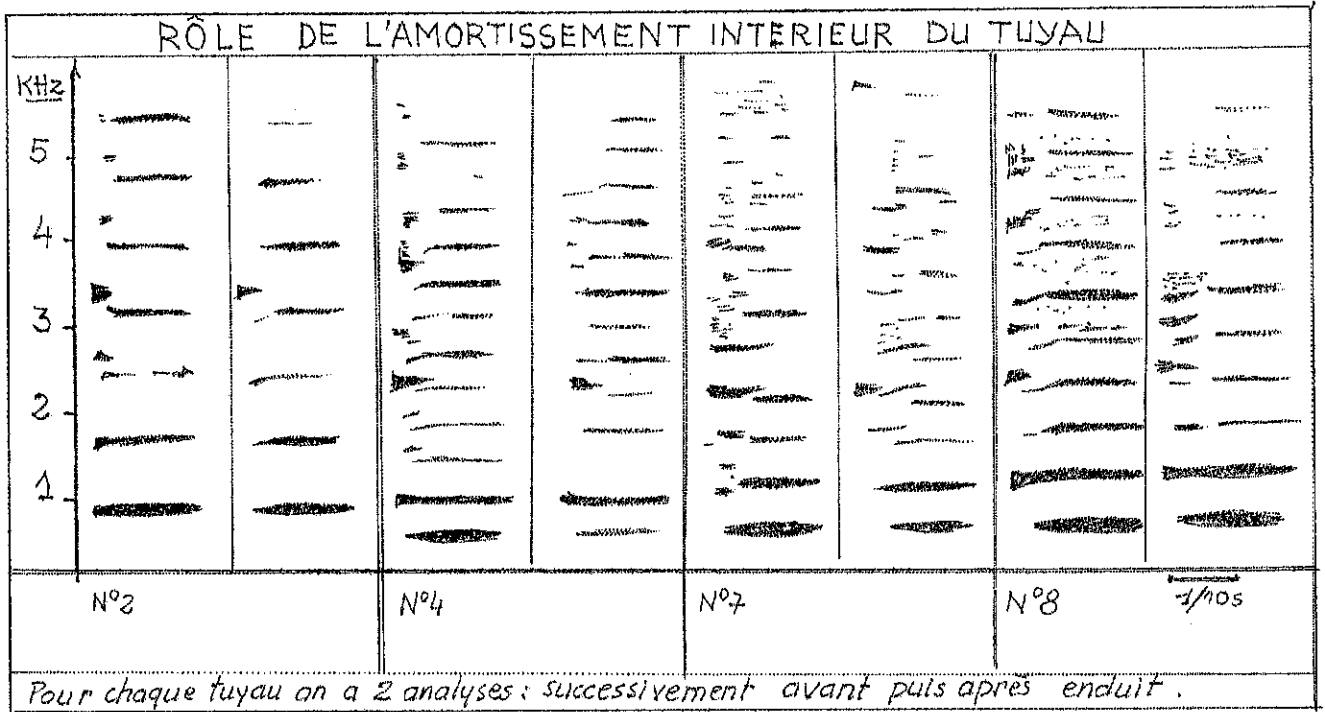


Figure 24

c) Etat de la lèvre supérieure.

Le rôle de l'état de surface du matériau au niveau de la lèvre supérieure est facile à mettre en évidence par une expérience simple.

Prenons 3 tuyaux d'étain dont nous enregistrons le son (fig. 25) puis nous recouvrons avec précaution la lèvre supérieure d'un morceau de tissu adhésif de très faible épaisseur. Cette opération

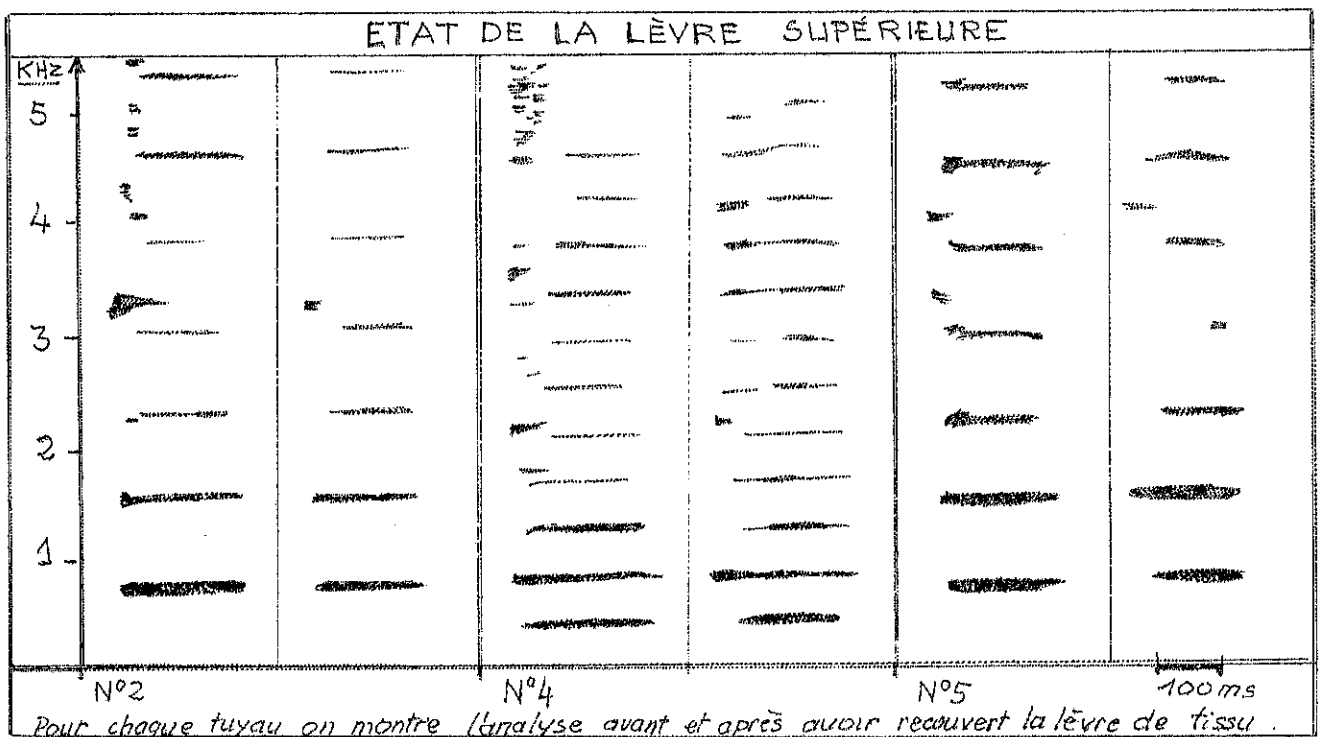


Figure 25

...../

a pour effet d'arrondir l'arête et de provoquer une diffusion des filets d'air au niveau des fibres du tissu. L'analyse du son des tuyaux, ainsi modifiés confirme les observations auditives : l'attaque du son est plus "douce", plus claire, moins bruyante. On voit en effet (fig.25) qu'une partie importante des composantes aiguës du son de bouche ont disparu, seul subsiste le partiel accroché en régime buccal. Dans les trois cas aussi, c'est l'harmonique 2 qui démarre en premier, et provoque la sensation de "clarté" de l'attaque.

En conclusion, on a fait des tuyaux de bois, d'étain, de cuivre, de zinc, on peut en faire en plâtre (cf. Mr FRANCOIS) en plastique... Une condition est impérative, il faut que les parois soient d'une rigidité suffisante. On peut alors obtenir pratiquement le même résultat sonore avec l'un ou l'autre de ces matériaux en jouant sur l'harmonisation de la bouche. Si les organiers ont conservé l'étain, il y a des raisons multiples à cela, tant pratiques qu'acoustiques et il ne semble pas que ce métal soit près d'être remplacé dans l'état actuel des choses.

VII - CONCLUSION

Nous avons essayé d'isoler les principaux paramètres qui interviennent dans la réalisation du son d'un tuyau à embouchure de flûte et de définir leurs rôles respectifs. La véritable complication provient de leurs interactions réciproques. Quand l'harmoniste égueule un tuyau, il modifie en réalité plusieurs paramètres simultanément : la fréquence du son de bouche, les rapports de fréquence des partiels, du tuyau, l'intensité du son global, la fréquence du fondamental etc.. et seule une longue expérience lui permet de maîtriser une telle complication, qu'il serait finalement possible de traiter par les voies de la physique classique si le tuyau n'était une " machine " destinée à solliciter et faire réagir le système auditif humain, variable elle même très mal connue et dont les interférences, on le sait ne simplifient pas la question ! Tout cela ne serait rien encore si le tuyau conservait ses propriétés lorsqu'il est incorporé dans un ensemble proprement organique, l'orgue, dont les mille parties réagissent les unes les autres. Ainsi la forme du signal rayonné par un tuyau dépend - elle du système mécanique : traction, soupapes, gravures, layes, buffet; et il ne faut pas oublier la réaction des tuyaux voisins, tellement importante qu'elle peut complètement "éteindre" le tuyau... Bref, nous n'avons traité ici qu'une partie du problème, à savoir le réglage d'un tuyau isolé. Combien on est loin déjà de la belle simplicité qu'imaginait au siècle dernier un MUTIN (Bib. 14)... "La préparation harmonique se fait d'après les méthodes raisonnées qui donnent les meilleurs résultats. Les tuyaux sortent de l'atelier, pour être placés dans l'orgue, à la longueur voulue, pourvus d'entailles avec un timbre approprié..." Nous ne pouvons plus être aussi naïfs ! Nos méthodes d'étude et de visualisation du son nous obligent de faire un effort pour repenser ces questions.

Mais c'est là le problème de l'harmonisation de l'orgue, sur lequel nous reviendrons plus tard, lors d'une réunion ultérieure.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - CASTELLENGO (M) - Le rôle du musicien dans les signaux rayonnés par la flûte traversière.
Comptes-rendus du 6ème ICA - Tokyo (1968).
- 2 - HELMHOLTZ (H) - Théorie physiologique de la musique.
Traduction française de M. GUEROULT
Ed. Masson - Paris (1874). p. 123 à 127.
- 3 - BOUASSE (H) - Tuyaux et résonateurs
Ed. Delagrave - Paris (1929).
- 4 - BOUASSE (H) - Instruments à vent
Ed. Delagrave - Paris (1929) T. I
- 5 - LOTTERMOSER (W) et MEYER (J). Orgelakustik in Einzeldarstellungen
Verlag das Musikinstrument - Frankfurt/Main (1967).
- 6 - MERCER (D.M.A.) - Organ pipe voicing adjustments as a guide to theories of the mechanism of the pipe.
Comptes-rendus du 5ème ICA - Liège (1965).
- 7 - BRUHAT (G) - Mécanique
Ed. Masson - Paris (1955).
- 8 - CASTELLENGO (M) - La flûte traversière
Bulletin du GAM N° 35
Ed. Int. Faculté des Sciences. Paris (1968).
- 9 - CARRIERE (Z) - Phénomènes à l'embouchure d'un tuyau d'orgue.
Journal de physique et le Radium. 6ème série. Paris (1925)
p. 52 à 64.
- 10 - ISING (H) - Uber die Tonbildung in Orgelpfeifen.
Comptes-rendus du 5ème ICA - Liège (1965).
- 11 - CREMER (L) et ISING (H) - Die selbsterregten Schwingungen von Orgelpfeifen.
in Acustica. Vol 19 N° 3, p. 143 à 153. Stuttgart (1967/68)
- 12 - Dom BEDOS de CELLES - L'art du Facteur d'Orgues.
Paris 1766.
Reproduction en Fac Similé par Bärenreiter. Kassel (1963).
- 13 - BACKUS (J) et HUNDLEY (T.C.) - Wall vibrations in flue organ pipes and their effect on tone
in J.A.S.A. Vol 39 N° 5; p. 936 à 945 - New-York (1966).
- 14 - MUTIN (Ch) - L'Orgue
in Encyclopédie de la Musique de A. LAVIGNAC
Delagrave (1925) p. 1102.

DISCUSSION

M. LEIPP - Vous avez mis en lumière un grand nombre de variables mais dans la réalité de l'orgue il faut encore tenir compte des interactions entre 2 tuyaux et de la combinatoire entre toutes ces variables qui réagissent les unes sur les autres.

Mlle CASTELLENGO - L'objet de la réunion était l'étude d'un tuyau isolé et je m'y suis volontairement limitée, laissant pour un autre GAM celle de l'harmonisation et d'étude de l'orgue lui-même.

M. LEIPP - Je crois que vous devriez nous dire quelques mots sur le difficile problème de la perception. Nous avons tous des oreilles différentes, et nous savons que pour chaque individu, la sensibilité à l'aigu diminue avec l'âge. Ceci peut expliquer des incompréhensions mutuelles : un harmoniste de 25 ans et un autre de 70 ans ne seront jamais d'accord. D'autre part, l'oreille est un système mécanique dont l'inertie, la constante de temps varie énormément selon les individus; certains pourront être gênés par les phénomènes d'attaque, d'autres ne les percevront pas. L'harmoniste idéal doit donc avoir une oreille statistique moyenne, pour satisfaire le plus grand nombre.

M. BOISSEAU - J'ai fait une remarque qui semble en contradiction avec ce que vous venez de dire. Des deux harmonistes que j'ai, c'est le plus jeune qui "pousse" sur l'aigu.

M. LEIPP - Bien sûr ! Ce n'est pas nécessaire^{ment} une question d'âge ! Le problème n'est pas simple. Il faut tenir compte de la musculature de l'oreille moyenne qui permet d'adapter le système auditif aux sons intenses; or cette musculature régit aussi la sensation de timbre et elle varie selon les individus, indépendamment de l'âge.

Mlle CASTELLENGO - Des réactions d'ordre esthétique interviennent aussi. Le goût, le conditionnement auditif de l'harmoniste et celui des auditeurs évoluent avec le temps. Beaucoup de jeunes harmonistes recherchent des sonorités claires et des attaques très franches, par réaction avec la génération précédente, peut être aussi en raison des modifications du bruit de fond depuis 50 ans.

M. LEIPP - On constate ces divergences d'esthétique au sein de réunions comme la Commission des Orgues et Monuments Historiques qui rassemble des personnalités d'âge fort différent. Le "goût" se définit par rapport à des références esthétiques que nous avons enregistrées dans notre mémoire. Comment se comprendre lorsque ces références diffèrent fondamentalement ?

M. FRANCOIS - Je voudrais rappeler à propos de la flûte traversière l'expérience que Mlle CASTELLENGO avait faite en comparant les sons émis par deux flûtistes sur différents instruments : Les résultats montraient une constante spectrographique liée au musicien beaucoup plus qu'à l'instrument. De la même façon un harmoniste habile fait ce qu'il veut et raccorde très bien la transition bois-métal. Je construis actuellement des tuyaux en plâtre qui fonctionnent très bien et j'espère pouvoir apporter prochainement une contribution à l'étude du rôle du matériau.

M. BOISSEAU - Si on introduit un tuyau en zinc dans un orgue tout en étain, il est impossible, même à un bon harmoniste de le repérer. Mais on ne peut pas faire un orgue entièrement en zinc; le matériau vibre.

M. ARMAND - Lorsqu'un tuyau vibre, il se produit des déformations périodiques de la colonne d'air et par suite, des troubles dans le fonctionnement du tuyau.

Mlle CASTELLENGO - Il semble bien que le matériau idéal doive être avant tout, inerte.

M. BOISSEAU - Comme vous l'avez montré, le poli des surfaces intérieures joue un rôle important. Nous savons que les tuyaux martelés doivent être coupés un peu plus courts que les tuyaux polis.

M. LHÔTE - Dans l'expérience du tuyau d'orgue en papier, selon que l'on touchait le tuyau à tel ou à tel autre endroit, on obtenait des modifications importantes de hauteur. On doit pouvoir faire une corrélation entre ces endroits et les noeuds et ventres de pression à l'intérieur du tuyau.

Mlle CASTELLENGO - Théoriquement oui; mais expérimentalement je n'y ai pas réussi. Il faudrait des cylindres de papier, tout d'une pièce. J'ai réalisé 3 tuyaux de même longueur et de même diamètre mais les résultats étaient incohérents en raison des différences apparemment infimes provenant du collage du papier suivant la génératrice du cylindre.

M. LHÔTE - L'expérience montre qu'un tuyau trop mince à la bouche n'attaque jamais nettement.

M. RUDRAUF - Sur les flûtes que je construis j'ai été amené à mettre une bague de renflement justement au $1/4$ du tuyau.

M. DELOSME - Pourquoi un tuyau de menue taille parle-t-il moins facilement qu'un tuyau de taille moyenne, ou de grosse taille ? Est-ce la raison pour laquelle on leur met un rouleau ?

M. LEIPP - Il faudrait s'entendre sur le terme " parler facilement ". Les tuyaux de menue taille ont habituellement beaucoup d'harmoniques et une attaque assez franche, mais pas, ou peu de fondamental qui "démontre" souvent mal et avec du retard.

M. L'HÔTE - C'est exact. Plus la colonne d'air est étroite, plus la résistivité est grande, plus le tuyau a du mal à se mettre en route.

M. BOISSEAU - Comment expliquez-vous que le rouleau empêche le tuyau d'octavier alors qu'il fait rentrer la lame d'air vers l'intérieur ?

Mlle CASTELLENGO - Il faudrait pouvoir visualiser pour voir exactement l'effet d'un rouleau. Tout dépend de la position de celui-ci par rapport à la lumière. S'il est très près, il peut en effet gêner le phénomène et dévier trop la lame d'air vers l'intérieur du tuyau; l'étude reste à faire ! Il semble en tout cas que les filets d'air s'enroulent autour du rouleau : c'est un phénomène classique et dynamique des fluides. On peut alors imaginer que la régularisation du débit à la bouche favorise le fondamental.

M. BOISSEAU - Pour harmoniser un jeu de gambe, il paraît que CAVAILLE-
- COLL égalisait tous les tuyaux à l'octave, puis mettait en-
suite le rouleau pour les faire parler en fondamental.

M. LHÔTE - Il y a mille manières de faire parler un tuyau, mais il
faut que les 56 tuyaux d'un jeu le fassent de la même façon !
C'est la difficulté.

Une question : dans vos expériences, quelle pression aviez vous
dans le pied des tuyaux ?

Mlle CASTELLENGO - Entre 20 et 30 mm d'eau pour les tuyaux ouverts ;
je n'avais pas de bourdons.

M. LEIPP - Ce sont des pressions très faibles. Il est certain que ce
sont les pressions dans le pied qui importent et non celles qu'
on pourrait relever dans le sommier. Bref tout dépend du rapport
entre la section du trou d'entrée du pied et le volume de celui-
ci, c'est le problème du " plein vent "....

M. LHÔTE - Comment expliquez-vous que le plein-vent marche avec 50
à 60 mm d'eau parfois ?

Mlle CASTELLENGO - A partir de quel diamètre du pied parle-t-on de
plein-vent ?

M. LHÔTE - Il y a "plein vent" dès que l'agrandissement du trou du
pied ne modifie plus la sonorité. En fait il faut encore consi-
dérer le rapport de la surface du trou du pied sur celle de la
lumière. On est en plein-vent quand les deux surfaces sont éga-
les.

Mlle CASTELLENGO - Dans l'expérience que j'ai faite sur l'agrandisse-
ment du trou du pied, je m'arrangeais pour conserver une pres-
sion constante dans le pied pour que les résultats soient com-
parables. Il y avait donc 21 mm d'eau de pression à l'intérieur
du pied en plein-vent.

M. LHÔTE - Il faut au moins 40 à 50 mm d'eau de pression si l'on
veut un son régulier sur tout l'ensemble du jeu.

M. BOISSEAU - Des pieds courts conviennent mieux en plein-vent qu'en
vent mesuré.

M. LHÔTE - A condition que le cône ne soit pas trop grand ! c'est
ce qui explique les phénomènes observés par Mlle CASTELLENGO
avec le tuyau dont elle coupait graduellement le pied. Un point
important est d'éviter les tourbillons à la base du pied. L'or-
gue de COMPENIUS à Frederiksborg a des tuyaux de bois dont les
pieds sont tous côniques. Je crois avoir observé que dans les
vieilles orgues, les tuyaux dont la chambre est très haute sont
ceux qui fonctionnent le mieux.

M. LEIPP - C'est évident : avec un grand pied il n'y a plus de tur-
bulence quand l'air arrive au niveau de la lumière.

M. BOISSEAU - Nous avons pu observer au laboratoire de M. BOURROT
à Poitiers, les tuyaux d'une vieille " montre " de CAVAILLE-
COLL dont on avait coupé les pieds dans le sens de la longueur.
On voyait très bien les traces de poussière qui matérialisaient
le trajet de l'air. Seuls les tuyaux dont les pieds étaient
longs avaient des traces régulières et bien nettes.

...../

- M. LHÔTE - Les pieds ne doivent pas être trop courts, mais on vérifie qu'il n'y a pas d'inconvénient à les allonger : les tuyaux "postés" fonctionnent très bien.
- M. ARMAND - A condition que le diamètre du postage soit suffisant, un tuyau posté pourrait-il parler sans pied?
- M. LHÔTE - Sûrement; d'ailleurs il arrive que des tuyaux trop prompts sur le sommier parlent avec aisance une fois postés au bout d'un tuyau de plomb qui réalise ainsi une sorte de coussin d'air. Dans un autre ordre d'idées, pourquoi les tuyaux coniques du type "fuseau" ont-ils un cortège de partiels tout à fait en dehors de la série harmonique ? Lorsqu'on souffle plus fort dans un tuyau conique on n'entend pas l'octave mais la 7ème ou tout autre chose.
- Mlle CASTELLENGO - Il s'agit de tuyaux partiellement fermés; les partiels sont faux. La question est de toutes façons à reprendre, car les manuels classiques ne traitent que de tuyaux coniques isolés or nous avons vu que le raccordement du tuyau à une bouche modifie complètement les phénomènes.
- M. BOISSEAU - Pour avoir une même fréquence, on doit couper les tuyaux du type "cône divergent", plus courts que les tuyaux cylindriques. Au contraire les tuyaux coniques du type fuseau sont coupés à longueur égale.
- M. LHÔTE - De combien se prolonge l'onde à la sortie du tuyau ? On donne généralement la valeur $1/6$ du diamètre ?
- M. LEIPP - C'est le problème de la célèbre "correction aux bouts", pour laquelle de nombreux expérimentateurs comme CAVAILLE-COLL ont donné des formules où une variable est en effet le diamètre. Mais ces formules ne restent correctes que pour un certain type de tuyaux. La valeur de $1/6$ est sûrement une simplification.
- M. BOISSEAU - Nous avons construit pour le laboratoire de POITIERS une flûte de 16' destinée à des expériences de visualisation avec de la poudre d'aluminium. Le tuyau était muni d'entailles à glissière pour permettre une mise au ton très précise. Or nous avons dû renoncer à ce système car les entailles perturbaient considérablement les phénomènes et empêchaient toute visualisation.
- M. LEIPP - Oui ! la moindre aspérité modifie parfois complètement les phénomènes. De plus, les expériences de visualisation pour intéressantes qu'elles sont présentent toutes un danger : on nous parle de plans alors qu'il s'agit de volumes. Les enroulements, les tourbillons sont des phénomènes volumiques très compliqués que l'on ne peut pas ramener à deux dimensions !
- M. GAUTHIER - Ce ne sont même pas des figures de révolution !
- M. LHÔTE - Il est étonnant que vous n'avez pas trouvé de différence entre le son des tuyaux à cheminée et ceux des tuyaux bouchés dont la calotte est percée d'un trou.
- Mlle CASTELLENGO - Les différences existent mais elles sont perceptivement peu importantes. De près, on note toujours plus de bruit avec le tuyau bouché percé d'un trou.

M. LEIPP - Le bruit provient de la turbulence qui se crée au niveau du trou. On trouve ici une justification dans la pratique qui consiste à souder les calottes des bourdons.

M. BOISSEAU - Beaucoup de bruits de bouches disparaissent à distance et sont noyés dans le bruit de fond de la salle.

M. LEIPP - C'est certain, car il s'agit de bruits faibles et aigus. Lorsque nous enregistrons un orgue nous prenons toujours la précaution de relever simultanément le son près de l'oreille de l'organiste et dans la salle, à la place de l'auditeur. Pour harmoniser, il faudrait que l'harmoniste se trouve en fait à la place de celui-ci !

M. BOISSEAU - L'harmonisation réserve bien des surprises. Au départ, on pense à un type de sonorité et on arrive à tout autre chose; parfois le résultat est plus intéressant que ce qu'on a prévu : c'est un des charmes du métier.

M. LHÔTE - Nous considérons le tuyau comme un ami; quand nous le faisons parler, nous ne lui imposons pas notre volonté ; au contraire, nous nous adaptons au tuyau.

M. LEIPP - Oui, le tuyau au départ, possède un certain caractère qu'il faut savoir exploiter au mieux. Rien ne sert de le brutaliser, et votre comparaison me séduit beaucoup ! Vous autres, facteurs d'orgue et harmonistes pratiquez, un métier difficile : le problème de l'harmonisation d'un jeu, d'un instrument, est passionnant et nous espérons provoquer prochainement une réunion sur ce sujet. Nous remercions les facteurs d'orgues présents aujourd'hui d'avoir bien voulu venir nous apporter leur expérience car aucun doute n'est permis : si nous voulons aboutir à des résultats valables en acoustique musicale nous n'y parviendrons qu'avec le concours des praticiens. Nous savons qu'ils détiennent la connaissance efficace de la combinatoire entre les mille variables que suppose tout "art". Mais l'exposé de Mlle CASTELLENGO a montré, je crois, que nous possédons à présent au laboratoire les moyens d'objectiver ce qui reste empirique et peut être de le faire mieux dans la mesure où l'on se donne la peine de l'étudier,

* *

*