

MICHELE CASTELLENGO

CONTRIBUTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE
DES TUYAUX A BOUCHE

THESE PRESENTEE POUR L'OBTENTION DU TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE
MENTION SCIENCES-UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE - PARIS 6

SOUTENUE LE 8.12.1976

COMMISSION D'EXAMEN:

MRS L.GAUTHIER R.SIESTRUNCK J.J.BERNARD E.LEIPP J.CHAILLEY JC.RISSET

Le Laboratoire d'Acoustique de l'Université Paris VI où cette étude a été menée à bien est un lieu de rencontre unique entre chercheurs, musiciens et facteurs. Il doit son existence à l'initiative du Professeur SIESTRUNCK et au soutien du doyen GAUTHIER auquel va toute notre reconnaissance.

M. le Professeur SIESTRUNCK a bien voulu diriger mon travail. L'intérêt qu'il a toujours témoigné à mes recherches a été pour moi un précieux encouragement. Je le remercie tout particulièrement d'avoir accepté de relire le manuscrit.

A Monsieur LEIPP, Directeur de recherches au C.N.R.S., à qui je dois ma formation en acoustique, je dédie ce travail en manière de remerciement. Dès mon arrivée au laboratoire il m'a patiemment initiée aux méthodes de travail spécifiques en acoustique musicale et m'a fait bénéficier de son expérience dans l'utilisation du sonographe. Les résultats de ses recherches dans le domaine de la perception m'ont permis d'aborder de façon fructueuse l'étude des instruments de musique. Ce texte bénéficie des nombreuses remarques qu'il a bien voulu me communiquer.

J'exprime à Mr le Professeur J.J. BERNARD, Directeur de l'U.E.R. de Mécanique toute ma gratitude pour avoir accepté d'être membre du Jury.

J'ai une dette toute particulière envers les musiciens qui ont donné beaucoup de leur temps pour venir au laboratoire jouer les instruments, et se prêter à des expériences quelquefois longues et fastidieuses. Je ne peux les citer tous. Ce sont principalement : P.-Y. ARTAUD, G. NOUFFLARD, P. SECHET pour la flûte traversière; C. LETTERON, Ph. SUZANNE pour la flûte à bec; F. SAIEB, Hassan NAHID pour le Ney; M. FABRE pour le galoubet.

Lors de l'étude de l'orgue j'ai été aimablement accueillie par M. WALTHER (Mulheisen), et par J.-G. KOENIG qui m'a autorisée à enregistrer pendant l'harmonisation d'un instrument (harmonistes J. FREUND et A. LECLERE).

Je remercie également tous ceux qui ont accepté de me prêter à long terme des instruments, ainsi que les responsables du Musée Instrumental du Conservatoire de Musique et du département d'Ethnomusicologie du Musée de l'Homme, qui m'ont donné accès aux instruments de leurs collections.

Madame BAGUR s'est chargée de la frappe du texte et M. SEGOUAT du tirage des planches de figures; je les en remercie très vivement.



CONTRIBUTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE

DES TUYAUX A BOUCHE

PLAN GENERAL

1ère Partie : INTRODUCTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE DES TUYAUX A BOUCHE.

- Chap. I - Position du problème
- Chap. II - Terminologie
- Chap. III - Dispositifs d'excitation des tuyaux à bouche
- Chap. IV - Appareils de mesure utilisés
- Chap. V - Principaux relevés expérimentaux utilisés dans ce travail

2ème Partie : ETUDE EXPERIMENTALE DES PARAMETRES LIES AU SYSTEME EXCITATEUR

- Chap. I - Le système lame d'air-biseau isolé
- Chap. II - Le tuyau à bouche; phénomènes généraux liés à l'alimentation du tuyau
- Chap. III - Problèmes posés sur l'étude des paramètres liés à la bouche
- Chap. IV - Quelques paramètres déterminants du fonctionnement des tuyaux à bouche
 - A - Fourniture d'air comprimé et formation d'un jet
 - B - Liaison jet-tuyau

3ème Partie : ETUDE EXPERIMENTALE DES PARAMETRES LIES AU TUYAU

- Chap. I - Tuyaux cylindriques partiellement fermés aux extrémités
- Chap. II - Rôle de la taille
- Chap. III - Rôle des trous latéraux
- Chap. IV - Particularités de la perce longitudinale des tuyaux cylindriques
- Chap. V - Tuyaux de section variable
- Chap. VI - Rôle du matériau

4ème Partie : INSTRUMENTS DE MUSIQUE A EMBOUCHURE DE FLUTE

- Chap. I - Classification des instruments de musique à embouchure de flûte
- Chap. II - Fiches caractéristiques de quelques instruments types
- Chap. III - Le problème de la justesse des flûtes
- Chap. IV - Timbres des flûtes
- Chap. V - Quelques problèmes particuliers à l'orgue et à la flûte traversière

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

1ère PARTIE

INTRODUCTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE

DES TUYAUX A BOUCHE

<u>CHAP.</u>	<u>I - POSITION DU PROBLEME</u>	<u>Pages</u>
§ 1.01	- Généralités.	1
§ 1.02	- Etudes antérieures	2
§ 1.03	- Méthodes traditionnelles en acoustique ; leurs inconvénients.	3
§ 1.04	- Difficultés propres à l'étude des instruments de musique	4
§ 1.05	- Idées directrices du présent travail.	7
§ 1.06	- Plan de l'étude.	9
<u>CHAP. II</u>	<u>- TERMINOLOGIE</u>	
§ 1.07	- Termes désignant les différentes parties d'un tuyau à bouche.	11
§ 1.08	- Définitions.	11
§ 1.09	- Désignation des notes et des octaves.	12
§ 1.10	- Intervalles : savarts et cents.	13
§ 1.11	- Désignation conventionnelle de certaines parties du tuyau.	13
<u>CHAP. III</u>	<u>- DISPOSITIFS D'EXCITATION DES TUYAUX A BOUCHE</u>	
§ 1.12	- Tuyaux utilisés.	14
	1) <u>Excitation au moyen d'un jet</u>	
§ 1.13	- Tuyau sans bouche.	14
§ 1.14	- Tuyau à bouche.	15
§ 1.15	- Emploi d'un gaz comprimé.	15
§ 1.16	- Cas des tuyaux d'orgue.	15
§ 1.17	- Dispositif mécanique pour la flûte traversière.	16
	2) <u>Excitation par haut-parleur</u>	
§ 1.18	- Recherche des résonances.	16
<u>CHAP. IV</u>	<u>- APPAREILS DE MESURE UTILISES</u>	
	1) <u>Mesure des grandeurs physiques</u>	
§ 1.19	- Mesure de la pression.	18
§ 1.20	- Mesure du débit.	18
	2) <u>Mesure des grandeurs acoustiques</u>	
§ 1.21	- Mesure de la fréquence.	19
§ 1.22	- Mesure de l'intensité.	19
§ 1.23	- Analyse spectrale : le sonographe.	19
§ 1.24	- Avantages et inconvénients de l'emploi du sonographe.	21
<u>CHAP. V</u>	<u>- PRINCIPAUX RELEVES EXPERIMENTAUX UTILISES DANS CE TRAVAIL</u>	
§ 1.25	- Relevé fréquence/pression.	23
§ 1.26	- Champ de liberté en pression des partiels.	24
§ 1.27	- Champ de liberté en fréquence des partiels.	24
§ 1.28	- Justesse des partiels.	25

2ème PARTIE

ETUDE EXPERIMENTALE DES PARAMETRES
LIES AU SYSTEME EXCITATEUR

<u>CHAP. I</u>	<u>- LE SYSTEME LAME D'AIR-BISEAU ISOLE</u>	<u>Pages</u>
§ 2.01	- Généralités.	1
§ 2.02	- Le nasoflûte, description.	2
§ 2.03	- Sons des régimes buccaux; spectrographie.	2
§ 2.04	- Tracé des courbes buccales.	3
§ 2.05	- Modification de la distance lumière-biseau.	3
§ 2.06	- Epaisseur du biseau : Rôle sur la fréquence et la composition spectrale	4
§ 2.07	- Bouche munie d'oreilles latérales.	5
§ 2.08	- Conclusions.	5
<u>CHAP. II</u>	<u>- LE TUYAU A BOUCHE. PHENOMENES GENERAUX LIES A L'ALIMENTATION DU TUYAU</u>	
§ 2.09	- Système lame-d'air biseau associé à un résonateur. Le tuyau à bouche (Rappels)	6
	1) <u>Production du son d'un tuyau à bouche</u>	
§ 2.10	- Lancement du tuyau : L'attaque.	8
§ 2.11	- Analyse de l'attaque d'un tuyau d'orgue; rôle du son de bouche.	10
§ 2.12	- Attaque en régime 2 de la flûte traversière moderne.	11
§ 2.13	- Attaque d'un son de fourche à la flûte à bec.	12
§ 2.14	- Attaque de la flûte traversière du théâtre Nô.	12
§ 2.15	- Permanence du son de bouche dans le son du tuyau.	
	2) <u>Modification de la pression d'alimentation</u>	
§ 2.16	- Variation du débit.	14
§ 2.17	- Variation de la fréquence avec la pression.	14
§ 2.18	- Variation d'intensité : tuyau d'orgue.	15
§ 2.19	- Variation d'intensité : flûte à bec.	15
§ 2.20	- Modification du contenu harmonique avec la pression d'alimentation.	16
§ 2.21	- Modification de l'attaque (tuyau d'orgue).	17
§ 2.22	- Zone utile de la courbe fréquence-pression (flûte à bec).	17
§ 2.23	- Pressions d'obtention des divers partiels.	19
§ 2.24	- Champ de liberté en pression (flûte à bec).	20
§ 2.25	- Champ de liberté en pression (galoubet).	20
§ 2.26	- Champ de liberté en fréquence (flûte à bec alto).	20
§ 2.27	- Phénomènes transitoires liés au changement de régime.	21
§ 2.28	- Coexistence de plusieurs partiels : polyphonie.	22
§ 2.29	- Conclusion.	24
<u>CHAP. III</u>	<u>- PROBLEMES POSES PAR L'ETUDE DES PARAMETRES LIES A LA BOUCHE</u>	
§ 2.30	- Tableau des paramètres liés à la bouche.	25
§ 2.31	- Principaux types d'embouchures de flûte.	27
§ 2.32	- Description des types fondamentaux d'embouchure de flûte.	28
§ 2.33	- Problèmes des paramètres associés.	30
<u>CHAP. IV</u>	<u>- QUELQUES PARAMETRES DETERMINANTS DU FONCTIONNEMENT DES TUYAUX A BOUCHE</u>	
	A - <u>Fourniture d'air comprimé et formation d'un jet</u>	
	1) <u>Le pied du tuyau d'orgue</u>	
§ 2.34	- Réglage du débit et de la pression de l'air. Expériences 1 et 2.	31
§ 2.35	- Longueur du pied et formation du jet.	33
§ 2.36	- Forme de la lumière : les "dents"	34

2) <u>Le bec de la flûte à bec</u>		
§ 2.37 - Description.		36
§ 2.38 - Réglage du débit.		36
§ 2.39 - Mesure du débit.		37
§ 2.40 - Variation du débit avec les dimensions de l'instrument.		38
§ 2.41 - Calcul du débit.		38
§ 2.42 - Rôle de l'humidité.		39
§ 2.43 - Les chanfreins des bords de la lumière.		42
3) <u>L'embouchure de la flûte traversière</u>		
§ 2.44 - Description.		43
§ 2.45 - Contrôle de la pression.		44
§ 2.46 - Contrôle du débit.		44
§ 2.47 - Forme de la lumière; bords de la lumière.		45
§ 2.48 - Rôle de la cavité buccale de l'instrumentiste.		
B - <u>Liaison jet-tuyau</u>		
1) <u>Positions relatives de la lumière et du biseau</u>		
§ 2.49 - Généralités.		47
§ 2.50 - Position de la lèvres supérieure (biseau); rôle sur le timbre (tuyau d'orgue).		48
§ 2.51 - Déplacement de l'orifice de sortie du jet; modification de la fréquence.		48
§ 2.52 - Modification de l'orientation du fond (tuyau d'orgue).		49
§ 2.53 - Orientation du jet (flûte traversière); expériences 1 et 2.		49
§ 2.54 - Réglage de la position de la lumière par rapport au biseau (flûte à bec).		51
§ 2.55 - Translation du jet par rapport au biseau; rôle sur le timbre (flûte à bec).		52
§ 2.56 - Conclusion.		55
2) <u>Distance lumière-biseau; Variation de la hauteur de bouche et de la surface de la bouche.</u>		
§ 2.57 - Généralités.		55
§ 2.58 - Expérience 1 : égouttement d'un tuyau d'orgue.		56
§ 2.59 - Flûte à bec de hauteur de bouche variable (rôles sur la fréquence et le timbre du tuyau).		57
§ 2.60 - Variation du réglage de la hauteur de bouche avec la fréquence et la taille du tuyau (orgue et flûte à bec).		60
§ 2.61 - Flûte traversière : réglage de la longueur du jet.		61
§ 2.62 - Conclusion		62
3) <u>Rôle des parois latérales de la bouche et de certains accessoires</u>		
§ 2.63 - Tuyau d'orgue : les oreilles.		63
§ 2.64 - Tuyau d'orgue : le rouleau.		63
§ 2.65 - La flûte à bec à jeu réglable : le caval turc.		65
§ 2.66 - Rôle de l'épaisseur des parois de la flûte à bec.		66
§ 2.67 - Absence de parois à la flûte traversière.		68
§ 2.68 - Conclusion à la 2ème Partie.		68

ETUDE EXPERIMENTALE DES PARAMETRES LIES AU TUYAU

<u>CHAP. I</u>	<u>- TUYAUX CYLINDRIQUES PARTIELLEMENT FERMES AUX EXTREMITES</u>	<u>Pages</u>
§ 3.01	- Généralités	1
§ 3.02	- Tuyau partiellement fermé à un bout, ouvert à l'autre.	1
§ 3.03	- Tuyau partiellement fermé à chaque bout.	3
§ 3.04	- Tuyau partiellement fermé à un bout, fermé à l'autre.	4
<u>CHAP. II</u>	<u>- ROLE DE LA TAILLE</u>	
§ 3.05	- Définition	6
§ 3.06	- Taille et justesse des partiels	6
§ 3.07	- Taille et champ de liberté en pression des partiels	7
§ 3.08	- Taille et timbre.	
<u>CHAP. III</u>	<u>- ROLE DES TROUS LATÉRAUX</u>	
§ 3.09	- Généralités; variables en présence	8
	1) <u>Forme des trous</u>	
§ 3.10	- Rôle de la cheminée du trou (fréquence).	9
§ 3.11	- Trou rond et trou rectangulaire.	10
	2) <u>Dimensions des trous</u>	
§ 3.12	- Evolution de la fréquence en fonction du diamètre du trou.	10
§ 3.13	- rapport du diamètre du trou au diamètre du tuyau.	11
	3) <u>Un trou; Rôles de la place et du diamètre</u>	
§ 3.14	- Place des trous et justesse des partiels. Expérience préliminaire.	11
§ 3.15	- Déplacement continu d'un trou latéral rectangulaire (5x5); conséquences sur les fréquences des partiels.	12
§ 3.16	- Même expérience avec un petit trou (5x2) et un grand trou (5x30).	13
§ 3.17	- Interprétation des résultats. Sauts en fréquence des partiels.	14
§ 3.18	- Comparaison entre les fréquences de résonance et les partiels émis par le tuyau à bouche.	15
§ 3.19	- Zones d'existence en fréquence, des partiels.	16
§ 3.20	- Le trou d'octave et le trou de quintoiement.	16
§ 3.21	- Effet du trou d'octave. Expérience avec une flûte à bec alto.	17
	4) <u>Deux trous : l'un fixe, l'autre mobile</u>	
§ 3.22	- Expérience.	18
§ 3.23	- Rôle du "bout-mort" - Expérience.	18
	5) <u>Systèmes de trous identiques équidistants</u>	
§ 3.24	- Généralités.	19
§ 3.25	- 2 et 3 trous; Etude de la première résonance.	20
§ 3.26	- 2 et 3 trous; Etude de la 2ème résonance; conséquence sur le timbre	20
§ 3.27	- 1 à 5 trous.	22
§ 3.28	- Les sons de fourche; définition	22
§ 3.29	- Fréquence des sons de fourche; doigtés baroque et moderne des flûtes à bec.	23
§ 3.30	- Timbre des sons de fourche.	24
§ 3.31	- Intervalles musicaux obtenus en débouchant les trous successivement.	26
§ 3.32	- Deux exemples de flûtes à trous identiques équidistants : la flûte à bec de thaïlande et le caval bulgare.	28

CHAP. IV - PARTICULARITES DE LA PERCE LONGITUDINALE DES TUYAUX CYLINDRIQUES

1) Rétrécissement localisé : déplacement d'un diaphragme mince

- § 3.33 - Généralités. 31
 § 3.34 - Tuyau ouvert aux deux bouts. 31
 § 3.35 - Tuyau ouvert à un bout et partiellement fermé à l'autre (tuyau à bouche). 32
 § 3.36 - Tuyau à bouche percé d'un trou. 33
 § 3.37 - Tuyau à bouche percé de trois trous équidistants.
 § 3.38 - Conclusion et application en facture instrumentale (Le ney en roseau). 36

2) Agrandissements localisés

- § 3.39 - Généralités. 38
 § 3.40 - Tuyau renflé dans sa partie médiane. 39
 § 3.41 - Agrandissements locaux dus aux cavités des trous latéraux bouchés extérieurement. 39
 § 3.42 - Agrandissement local se produisant au raccord de deux tubes (cas d'un galoubet). 40
 § 3.43 - Flûte à bec dont on tire la tête pour baisser le diapason. 41

3) Association de deux tuyaux de diamètre différent; Tuyaux à bouche à cheminée.

- § 3.44 - Généralités, définition. 42
 § 3.45 - Cheminée ouverte de longueur variable : fréquence et justesse des partiels. 43
 § 3.46 - Variation du timbre du tuyau avec la longueur de la cheminée ouverte. 44
 § 3.47 - Cheminée fermée de longueur variable : fréquence des partiels et timbre. 46
 § 3.48 - Cheminée de longueur donnée, ouverte ou fermée; timbre du tuyau. 47
 § 3.49 - Rappel de la théorie élémentaire des tuyaux à cheminée. 48
 § 3.50 - Interprétation des résultats expérimentaux en fonction des données théoriques. 49
 § 3.51 - Tuyau à cheminée et bourdon à calotte percée de même fréquence. 51
 § 3.52 - Tuyau à cheminée de fréquence donnée : diamètre et longueur de la cheminée, variables. 52
 § 3.53 - Cheminée de longueur donnée coulissant dans la calotte du bourdon. 53
 § 3.54 - Le jeu de flûte à cheminée dans l'orgue. Etude spectrographique. 54
 § 3.55 - Conclusions. 55

CHAP. V - TUYAUX DE SECTION VARIABLE

1) Tuyaux coniques et tronconiques

- § 3.56 - Généralités 56
 § 3.57 - Cône complet 56
 § 3.58 - Tuyaux tronconiques ouverts aux deux bouts ou fermés à un bout 56

2) Troncs de cône partiellement fermés à une extrémité

- § 3.59 - Variation de la fermeture partielle : conséquence sur les fréquences des partiels et leur justesse relative (résonances). 58
 § 3.60 - Tuyaux tronconiques à bouche; justesse des partiels. 59
 § 3.61 - Timbre des tuyaux tronconiques à bouche. 59

3ème PARTIE

Pages

3) Tuyaux cylindro-coniques

§ 3.62	- Généralités.	60
§ 3.63	- Tuyaux cylindro-coniques ouverts aux deux bouts; théorie élémentaire (rappels).	60
§ 3.64	- Excitation au bout cylindrique; comparaison des cylindrocones convergents ou divergents et du tuyau cylindrique de même longueur (partiels, timbre).	62
§ 3.65	- Même cas que précédemment : rôle du rapport de longueur des parties cylindrique et conique.	64
§ 3.66	- Excitation au bout conique ou au bout cylindrique (justesse des partiels).	66
§ 3.67	- Application à la flûte traversière moderne (BOEHM).	66
§ 3.68	- Tuyaux coniques utilisés en facture d'orgue; spectrographie.	68

4) Tuyaux " composites "

§ 3.69	- Généralités	70
§ 3.70	- Le ney Turco-arabe	70
§ 3.71	- La flûte traversière du théâtre Nô Japonais.	71
§ 3.72	- La flûte traversière baroque.	71
§ 3.73	- Deux flûtes traversières hybrides	73
§ 3.74	- La flûte à bec baroque	74

CHAP. VI - RÔLE DU MATERIAU

§ 3.75	- Généralités	76
§ 3.76	- Rôle acoustique du matériau au niveau de la bouche.	76
§ 3.77	- Vibration des parois.	77
§ 3.78	- Affaiblissement local de la paroi : le mirliton.	79
§ 3.79	- Etat de surface interne du tuyau.	80
§ 3.80	- Conclusions	80

4ème PARTIE

INSTRUMENTS DE MUSIQUE A EMBOUCHURE DE FLÛTE

	<u>Pages</u>
<u>CHAP. I</u> - <u>CLASSIFICATION DES INSTRUMENTS A EMBOUCHURE DE FLÛTE</u>	
§ 4.01 - Généralités.	1
§ 4.02 - Classifications existantes.	1
§ 4.03 - Typologie des instruments.	3
§ 4.04 - Classification automatique.	4
§ 4.05 - Eléments pour une classification sur des bases acoustiques.	6
<u>CHAP. II</u> - <u>FICHES CARACTERISTIQUES DE QUELQUES INSTRUMENTS TYPES</u>	
§ 4.06 - Généralités	8
§ 4.07 - Dessins des instruments et mensurations	8
§ 4.08 - Remarques à propos des fiches	9
§ 4.09 - 1 . Le galoubet .	10
§ 4.10 - 2 . Le flageolet .	11
§ 4.11 - 3 . La flûte à bec à 6 trous .	12
§ 4.12 - 4 . Le pipeau de bambou .	13
§ 4.13 - 5 . La flûte à bec à 8 trous .	14
§ 4.14 - 6 . La flûte à bec baroque .	15
§ 4.15 - 7 . Le caval turc .	16
§ 4.16 - 8 . La flûte double yougoslave .	17
§ 4.17 - 9 . La kena .	18
§ 4.18 - 10 . La flûte traversière du théâtre Nô .	19
§ 4.19 - 11 . La flûte traversière à 4 clés .	20
§ 4.20 - 12 . La flûte traversière BOEHM .	21
§ 4.21 - 13 . Le Ney Iranien .	22
§ 4.22 - 14 . Le Ney turco-arabe .	22 et 23
<u>CHAP. III</u> - <u>LE PROBLEME DE LA JUSTESSE DES FLUTES</u>	
§ 4.23 - Généralités .	25
§ 4.24 - Test des instruments .	25
§ 4.25 - Flûte traversière; un même instrument joué par 2 musiciens .	26
§ 4.26 - Flûte à bec; Champ de liberté en fréquence et justesse de l'exécution musicale .	26
§ 4.27 - Justesse physique et justesse perçue; problèmes de perception de la hauteur .	27
§ 4.28 - Conclusions .	28
<u>CHAP. IV</u> - <u>TIMBRES DES FLUTES</u>	
§ 4.29 - Le timbre - Définitions .	29
§ 4.30 - 1er niveau : le timbre " flûte " .	29
§ 4.31 - 2ème niveau : timbre des différents types de flûtes .	31
§ 4.32 - Timbre d'un instrument à excitation réglable (flûte traversière) .	32
§ 4.33 - Comparaison de trois flûtes classiques occidentales : la flûte traversière à une clé, la flûte moderne (BOEHM) et la flûte à bec baroque .	32
§ 4.34 - " Panorama " spectrographique des flûtes .	35

4ème PARTIE

CHAP. V - QUELQUES PROBLEMES PARTICULIERS A L'ORGUE ET A LA FLUTE TRAVERSIERE. Pages

A - LE BOUCHON DE LA FLUTE TRAVERSIERE.

§ 4.35	- Généralités	36
§ 4.36	- Place du bouchon : Tuyau cylindrique sans trou; Excitation fixe.	36
§ 4.37	- Flûte traversière à une clé cylindro-conique. Expérience du déplacement du bouchon.	37
§ 4.38	- Conclusions.	38

B - PROBLEMES RELATIFS A L'ORGUE.

§ 4.39	- Généralités.	39
§ 4.40	- Action réciproque de deux tuyaux voisins.	40
§ 4.41	- Un jeu d'orgue; évolution des dimensions des tuyaux.	41
§ 4.42	- Dimensions comparées des différents jeux.	42
§ 4.43	- Analyse spectrographique d'un jeu avant et après harmonisation.	43
§ 4.44	- Spectrographie de quelques jeux d'orgue.	44

CONCLUSION GENERALE.

BIBLIOGRAPHIE.

1ère PARTIE

INTRODUCTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE

DES TUYAUX A BOUCHE

1ère PARTIEINTRODUCTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE
DES TUYAUX A BOUCHECHAPITRE I - POSITION DU PROBLEME§ 1.01 - Généralités

Le but que nous nous sommes proposé tout au long de ce travail est l'étude expérimentale des principaux paramètres qui régissent le fonctionnement des tuyaux à bouche employés comme instruments de musique.

Le sujet est vaste : il concerne aussi bien les flûtes de tous pays et de toutes époques que l'orgue dont la majeure partie des tuyaux est à embouchure de flûte. Il y a donc nécessairement des omissions, des lacunes, d'autant que l'étude d'un paramètre donné doit être envisagée non seulement du point de vue de son action sur la fréquence et l'intensité du son émis par le tuyau, mais également sur les propriétés musicales du tuyau à bouche : timbre (nombre et intensité des harmoniques, transitoires d'attaque) justesse des partiels successifs, intervalles obtenus en débouchant les trous successivement etc... ce qui multiplie les expériences et les résultats.

Par contre l'étude comparée d'instruments de types différents offre un grand intérêt surtout en ce qui concerne les paramètres de l'excitation, car bien souvent les résultats sont transposables d'un instrument à l'autre : les instruments à bouche fixe permettent ainsi de définir les variables en présence et de comprendre le fonctionnement de ceux où le musicien modifie ces variables de façon difficilement accessible à l'expérimentation.

Grace aux moyens modernes d'analyse dont nous disposons nous avons pu développer l'étude des phénomènes transitoires jusqu'alors peu étudiés, alors qu'ils sont d'importance capitale dans la constitution du timbre.

Enfin nous avons la chance de bénéficier d'un corps de doctrine relatif aux propriétés du système auditif élaboré par M. LEIPP. Ces données sont indispensables si l'on veut comprendre les particularités physiques et acoustiques d'instruments faits avant tout pour être entendus.

§ 1.02 - Etudes antérieures

Les tuyaux à bouche ont déjà suscité un grand nombre de travaux. En 1762, D. BERNOULLI établit par analogie avec les lois des cordes vibrantes, celles des tuyaux d'orgue diversement construits (cylindriques, à cheminées, coniques) ouverts ou fermés. En 1777 LAMBERT étudie l'effet des trous latéraux sur une flûte traversière à une clé.

Mais il faut attendre la première moitié du 19ème siècle pour voir paraître les premières études expérimentales du système excitateur avec, principalement SAVART, CAVAILLE-COLL et VON SCHAICK.

Ces divers travaux repris, complétés par d'autres auteurs ne concernent que l'une ou l'autre partie du tuyau à bouche; seul BOUASSE pose en 1929 les bases d'une étude systématique du tuyau à bouche : lancement et entretien du tuyau, régimes de fonctionnement, rôle des paramètres de la bouche. Il rend compte d'un grand nombre d'expériences faites par divers chercheurs et en propose lui-même; le tout est dispersé dans ses ouvrages (bib. BOUASSE 2, 3 et 5). Ce fut pour nous une source continuelle d'idées et de réflexion. Toutefois l'étude des phénomènes liés au tuyau (trous, modifications de la perce) n'y est traitée que pour des tuyaux isolés, indépendamment du système excitateur.

L'acoustique a connu véritablement un renouveau avec l'apparition du magnétophone. Les trente dernières années ont vu surgir un grand nombre d'études expérimentales spécialisées ayant trait principalement aux 2 instruments connus et pratiqués en musique occidentale classique : l'orgue et la flûte traversière. On peut les regrouper sous les rubriques suivantes :

- Analyse des transitoires d'attaque de la flûte traversière (SAUNDERS 1946), de l'orgue (J. MEYER 1960, RAKOWSKI 1966, J. KEELER 1972).

Les méthodes d'analyse employées (oscillographe, enregistrement de l'évolution de l'intensité de chaque harmonique dans le temps) ne permettent pas de déceler les phénomènes inharmoniques du son de bouche (SAUNDERS, KEELER) ou donnent trop d'importance aux premiers harmoniques au détriment des composantes aiguës souvent importantes du point de vue perceptif (J. MEYER). Il n'est pas non plus tenu compte des bruits d'écoulement. Enfin le souci de conserver la précision en intensité conduit à des représentations graphiques complexes (une courbe par harmonique) sur lesquelles le mécanisme de l'attaque n'est plus clairement lisible.

- Etude de l'embouchure de flûte traversière : perce longitudinale de la tête, place du bouchon et couverture à l'embouchure (BENADE et FRENCH 1965, COLTMAN 1966) para-

mètres de l'excitation (Y. ANDO 1966 à 1968, KRÜGER 1967), mécanisme de l'entretien par le jet (COLTMAN 1968, ELDER 1973), comparaison des fréquences de résonances et des sons joués par le musicien (COLTMAN 1966, NEDERVEEN 1973).

- Paramètres de l'embouchure d'un tuyau d'orgue (MERCER 1965).
- Etudes des résonances de la flûte à bec (MUHLE 1966).
- Etude générale de l'orgue par LOTTERMOSE et J. MEYER dès 1966.

D'une façon générale ces travaux font peu de place à la spectrographie et passent sous silence les problèmes soulevés par la perception des sons musicaux.

Il n'existe pas de travail d'ensemble sur les tuyaux à bouche traitant parallèlement de l'orgue, des flûtes et incluant les flûtes traditionnelles des divers pays.

Enfin les auteurs ne considèrent que le fonctionnement stationnaire du tuyau à bouche. Cela est dû en grande partie aux méthodes expérimentales et aux appareils de mesure employés.

§ 1.03 - Méthodes traditionnelles en acoustique - Inconvénients.

Les méthodes classiques d'étude ont pour but d'éliminer les variables de l'entretien à la bouche, afin d'obtenir des résultats précis et mesurables.

- Dans l'excitation par résonance l'alimentation aérienne est supprimée. Il ne s'agit plus à proprement parler de tuyau à bouche. celle-ci est alors assimilable à une fermeture partielle du tuyau.
- L'utilisation d'une soufflerie à pression constante convient pour l'étude de tuyaux d'orgue, à condition de reproduire les conditions normales d'alimentation (débit, pression, dimensions des gravures et des soupapes) mais, sauf cas particulier elle n'a que peu d'intérêt pour l'étude des flûtes dont l'intérêt musical est précisément lié aux variations de pression et aux modifications sonores qui lui sont liées (fréquence, intensité timbre). Plutôt que des mesures ponctuelles il est souvent préférable d'examiner les limites de variation de chaque paramètre, d'étudier des allures - moins précises - mais significatives.

On peut faire les mêmes remarques à propos de la mesure des grandeurs acoustiques. Le désir d'obtenir des résultats précis en intensité et en fréquence a conduit les chercheurs à ne s'intéresser qu'aux phénomènes stationnaires (on élimine la variable

temps). Or il ne faut pas perdre de vue qu'il est courant, avec une flûte à bec (et à fortiori avec une flûte à excitation réglable) de modifier la fréquence d'un demi-ton (6 % de la fréquence) par le seul souffle !

Dans tous les cas il nous semble important de partir de l'étude de l'instrument dans les conditions normales de jeu, et de n'effectuer des expériences sur " mannequin " avec soufflerie, que dans certains cas particuliers, en confrontant les résultats avec ceux que l'on obtient lors de l'utilisation normale.

Parmi les auteurs cités précédemment seuls COLTMAN (1966) et NEDERVEEN (1973) confrontent les résultats de leurs expériences en laboratoire avec le jeu des musiciens, encore ne leur demandent-ils que des sons fixes, ce qui est fort éloigné de la réalité musicale...

§ 1.04 - Difficultés propres à l'étude des instruments de musique

Un instrument de musique est d'abord une machine destinée à produire des sons utilisés en musique, et en tant que telle il peut faire l'objet d'une étude physique expérimentale, à condition que les sons émis soient reproductibles pour être mesurés de façon suffisamment précise.

Ceci conduit à éliminer le musicien, facteur de variabilité, et à le remplacer par une soufflerie alimentant un système d'excitation mécanique. Une telle démarche, valable pour une bonne partie dans l'étude des tuyaux d'orgue où le rôle du musicien est très réduit n'est plus applicable lorsqu'il s'agit d'instruments où le musicien contrôle tout ou partie de l'excitation. S'il est possible de remplacer le joueur de flûte à bec par une soufflerie et la bouche du flûtiste " traversier " par un système mécanique, ce ne peut être que pour certaines expériences bien particulières, et à condition de toujours raccorder les résultats avec ceux que l'on obtient lors du fonctionnement normal.

Nous disposons maintenant de tous les moyens désirables pour analyser le son dans ses trois dimensions et faire une étude de physique expérimentale du fonctionnement et du rayonnement des machines sonores. Mais dans le cas particulier des instruments de musique ce type d'étude - qui représente une proportion notable du mémoire en cause - est insuffisante.

En effet, l'instrument de musique, en l'occurrence le tuyau à bouche n'est qu'un des maillons de la chaîne de communication des messages qui relie le musicien à l'auditeur (Bib. LEIPP (4) 1960) et dont nous devons tenir compte sous peine de ne pas comprendre certains paradoxes.

véhiculé par les variations temporelles des grandeurs physiques. Ceci confirme l'importance des phénomènes transitoires en musique et montre bien que dès que l'on remplace le musicien (générateur variable) par une soufflerie stable, on risque de négliger une part importante des phénomènes.

Supposant les propriétés de l'oreille bien connues de façon statistiques, il reste une grosse difficulté qui vient de la grande variabilité individuelle comme nous pouvons le constater nous-même lors des tests que nous pratiquons au laboratoire. Il est donc nécessaire de bien connaître l'oreille des musiciens avec qui l'on est amené à travailler. Le cas idéal est celui où l'expérimentateur est lui-même le musicien exécutant. Aussi avons nous appris à jouer de la flûte traversière et de la flûte à bec, et à souffler dans toutes sortes de tuyaux. Ceci nous a permis de débrouiller par nous-même quelques expériences simples et surtout de pouvoir mieux communiquer avec les musiciens professionnels dont nous ne saurions nous passer, car la maîtrise d'un instrument apparemment " facile " comme la flûte demande de longues années de pratique journalière.

L'avis que peut porter un musicien sur la qualité d'un instrument dépend donc des performances de son oreille anatomique mais aussi de son passé auditif individuel inscrit dans ses mémoires. Il est indispensable d'en tenir compte lorsqu'on étudie le timbre, la justesse, à plus forte raison s'il s'agit d'instruments qui ne sont plus en usage ou qui appartiennent à des civilisations étrangères.

Enfin les limites anatomo-physiologiques de l'exécutant humain (surface et écartement des doigts, débit aérien) ont imposé de tous temps des contraintes aux facteurs d'instruments à trous latéraux; la construction et l'évolution de ceux-ci n'est compréhensible que si l'on en tient compte.

Ces quelques remarques montrent bien les difficultés propres à l'étude des instruments de musique. Les méthodes classiques d'étude des machines sonores sont rarement applicables en acoustique musicale où l'on doit à tout moment confronter les résultats physiques à la réalité perceptive. On en conclut rapidement que l'appareillage et les méthodes adéquates à cette étude ne sont pas ceux qui donnent les résultats les plus précis, mais ceux qui fournissent des documents que l'on peut mettre en parallèle avec la sensation, et l'on est souvent conduit à sacrifier la précision pour se contenter d'observer l'allure des phénomènes, le sens de leurs variations, leurs limites, souvent floues. Nous ne faisons en ce domaine, que reprendre les idées et les méthodes de travail développées par E. LEIPP (2) et (5) mais avec une conviction que renforcent à chaque étude les résultats fructueux que nous obtenons.

§ 1.05 - Idées directrices du présent travail

- Le tuyau à bouche doit être étudié comme un tout

Nous avons vu que les études actuelles sont très spécialisées. En dehors des traités de BOUASSE nous ne possédons pas de travail d'ensemble rassemblant les données connues sur l'orgue, la flûte traversière, la flûte à bec mais aussi sur les instruments traditionnels populaires d'Europe et d'autres pays, instruments qui posent souvent des problèmes intéressants.

Les expériences que nous possédons sur le rôle des trous latéraux, le comportement des tuyaux à cheminée ont été menées avec des tuyaux ouverts aux deux bouts (BOUASSE) ou en excitant le tuyau par résonance (GUITTARD, MÜHLE). Il était nécessaire de les reprendre avec le tuyau à bouche excité normalement par le système lame d'aigle. Certes, en procédant ainsi on limite la portée des résultats puisque ceux-ci ne sont valables que pour les conditions particulières de l'expérience mais nous avons pu ainsi montrer le choix que fait la bouche parmi les fréquences prévues par la théorie, et expliquer certains paradoxes.

Dans le cas de la flûte traversière on ne peut comprendre les particularités de construction de l'instrument (perce longitudinale, trous latéraux) que si l'on a étudié les paramètres de l'excitation que le musicien modifie en cours de jeu. L'expérience montre qu'une étude du tuyau isolé n'a pas de sens.

- Raccord avec la réalité - application aux instruments.

Le souci que nous avons toujours d'appliquer les résultats de nos expériences aux instruments réels nous a permis d'expliquer plusieurs points de la facture des flûtes : place des trous en rapport avec la perce, principaux systèmes de doigtés des flûtes.

Chaque fois que cela était possible nous avons étudié l'instrument dans les conditions normales de jeu en relevant les champs de liberté en fréquence, en pression, ce qui a l'avantage de tenir compte de l'humidité et de la température du souffle humain (cf. § 1.27.)

- Importance de la spectrographie évolutive dans le temps.

" Les hypothèses, les théories, les résultats, en toute recherche sont toujours directement liés aux moyens d'investigation dont on dispose à un moment donné "

(LEIPP (5) - p.4). De ce point de vue nous avons sur BOUASSE l'avantage de pouvoir bénéficier d'appareils d'enregistrement et d'analyse du son, qui toutefois ne dispensent pas de l'usage des oreilles. L'écoute reste un point fondamental.

Avec le seul magnétophone il est possible, par montage de comparer des instruments différents à quelques secondes d'intervalle ou le même instrument avant et après modification. En modifiant la vitesse de défilement (en particulier en ralentissant), l'oreille peut s'exercer à entendre les phénomènes complexes des transitoires d'attaque.

Ayant ainsi dégrossi les " phénomènes " à l'oreille nous pouvions utiliser avec profit l'analyse spectrographique qui a l'avantage de fournir des documents objectifs.

Tout ou presque étant à faire dans ce domaine nous avons abondamment utilisé le sonographe en particulier pour l'étude des paramètres liés à la bouche, mais aussi lors d'expériences sur la perce longitudinale (cheminées, tuyaux, tronconiques etc...) ou latérale (fourches). Lorsqu'on tient compte des phénomènes transitoires, pour lesquels le sonographe est particulièrement bien adapté, on constate que les signaux rayonnés par les tuyaux à bouche ne sont pas aussi simples qu'on le dit traditionnellement.

- Intérêt de l'étude des instruments de musique traditionnels

Un instrument de musique, qu'il s'agisse du galoubet, du ney Iranien ou de l'orgue est le point d'aboutissement d'une évolution lente, complexe. Par approximations successives les facteurs ont mis au point de façon empirique le meilleurs compromis entre les exigences anatomiques, perceptives et musicales du moment. Ces dernières se modifient au cours des temps et les instruments se transforment également, s'adaptent ou disparaissent.

Les formes les plus stéréotypées ont particulièrement retenu notre attention et suscité bien des expériences. Mais certains instruments de transition, certaines flûtes hybrides (flûte conique à système Boehm par exemple) qui n'ont eu qu'une vie éphémère, sont au moins aussi riches d'enseignement lorsqu'on réussit à expliquer leur échec. Rappelons enfin que les propriétés de l'oreille sont inscrites dans les instruments conçus et perfectionnés pour satisfaire les utilisateurs humains.

- Travail en collaboration avec les musiciens et les facteurs

Seul un musicien habile peut exploiter toutes les ressources d'une flûte et plus celle-ci est d'apparence simple (ney, tilinca roumaine) plus le rôle du musicien est déterminant sur le timbre, la justesse et l'intensité. Nous avons eu la chance de pouvoir travailler avec des flûtistes compétents et patients qui ont accepté d'effectuer de nombreux champs de liberté en fréquence et des enregistrements de timbre. C'est d'ailleurs l'absence de joueur de flûte de pan, de flûte nasale et de flûte à encoche qui explique que nous ayons peu de résultats sur ces instruments.

Bénéficiant de notre formation musicale antérieure nous avons pu éviter les difficultés soulevées par la communication entre musiciens et scientifiques, difficultés provenant en grande partie de la terminologie.

Lorsque nous avons pu également travailler avec un facteur nous nous sommes trouvés dans les meilleures conditions possibles pour faire les expériences significatives et en tirer des résultats pratiques. Ce fut le cas pour la flûte à bec et la flûte traversière, mais principalement pour l'orgue où le rôle du facteur et de l'harmoniste sont véritablement déterminant.

§ 1.06 - Plan de l'étude

Nous décrivons pour commencer les principaux appareils employés au cours du travail ainsi que les relevés expérimentaux fréquemment utilisés.

Tout instrument de musique comprenant un excitateur - ici la bouche - et un " corps sonore " - le ou les tuyau(x) - l'exposé du travail expérimental se divise naturellement selon ces deux rubriques.

L'étude des transitoires d'attaque, commune à toutes sortes de tuyaux à bouche, est traitée dans la deuxième partie, mais pour les paramètres de la bouche nous avons été amenée à regrouper les expériences autour de 3 types fondamentaux : le tuyau d'orgue, la flûte à bec et la flûte traversière.

Nous abordons dans la troisième partie le rôle des principaux paramètres liés au tuyau : conditions aux limites, proportions, perce latérale et longitudinale. Le rôle du matériau, qui est dépendant à la fois des paramètres de la bouche et de ceux du tuyau est traité en dernier lieu.

Dans la quatrième partie nous tenterons de rassembler les données acquises à propos d'instruments réels; les fiches donnent sous forme condensée, un maximum de renseignements sur quelques instruments types que nous avons pu étudier de près.

- Travail en collaboration avec les musiciens et les facteurs

Seul un musicien habile peut exploiter toutes les ressources d'une flûte et plus celle-ci est d'apparence simple (ney, tîlinca roumaine) plus le rôle du musicien est déterminant sur le timbre, la justesse et l'intensité. Nous avons eu la chance de pouvoir travailler avec des flûtistes compétents et patients qui ont accepté d'effectuer de nombreux champs de liberté en fréquence et des enregistrements de timbre. C'est d'ailleurs l'absence de joueur de flûte de pan, de flûte nasale et de flûte à encoche qui explique que nous ayons peu de résultats sur ces instruments.

Bénéficiant de notre formation musicale antérieure nous avons pu éviter les difficultés soulevées par la communication entre musiciens et scientifiques, difficultés provenant en grande partie de la terminologie.

Lorsque nous avons pu également travailler avec un facteur nous nous sommes trouvés dans les meilleures conditions possibles pour faire les expériences significatives et en tirer des résultats pratiques. Ce fut le cas pour la flûte à bec et la flûte traversière, mais principalement pour l'orgue où le rôle du facteur et de l'harmoniste sont véritablement déterminant.

§ 1.06 - Plan de l'étude

Nous décrivons pour commencer les principaux appareils employés au cours du travail ainsi que les relevés expérimentaux fréquemment utilisés.

Tout instrument de musique comprenant un excitateur - ici la bouche - et un " corps sonore " - le ou les tuyau(x) - l'exposé du travail expérimental se divise naturellement selon ces deux rubriques.

L'étude des transitoires d'attaque, commune à toutes sortes de tuyaux à bouche, est traitée dans la deuxième partie, mais pour les paramètres de la bouche nous avons été amenés à regrouper les expériences autour de 3 types fondamentaux : le tuyau d'orgue, la flûte à bec et la flûte traversière.

Nous abordons dans la troisième partie le rôle des principaux paramètres liés au tuyau : conditions aux limites, proportions, perce latérale et longitudinale. Le rôle du matériau, qui est dépendant à la fois des paramètres de la bouche et de ceux du tuyau est traité en dernier lieu.

Dans la quatrième partie nous tenterons de rassembler les données acquises à propos d'instruments réels; les fiches donnent sous forme condensée, un maximum de renseignements sur quelques instruments types que nous avons pu étudier de près.

On y voit les diverses solutions acoustiques adoptées par les facteurs pour trouver un compromis entre les exigences de justesse, de timbre de maniabilité, en vue d'un emploi musical déterminé.

Les notions de justesse et de timbre font l'objet d'une étude séparée de même que l'orgue dont l'étendue sonore et la multiplicité des tuyaux posent des problèmes particuliers.



CHAPITRE II - TERMINOLOGIE§ 1.07 - Termes désignant les différentes parties d'un tuyau à embouchure de flûte

Les termes désignant les différentes parties d'un tuyau à bouche sont loin d'être normalisés. Physiciens, facteurs d'instruments, musiciens ne parlent pas la même langue. La même partie d'un tuyau est désignée, par des mots différents selon les métiers, ou, ce qui prête encore plus à confusion, un même mot peut se rapporter à des parties différentes du tuyau.

Sans vouloir prendre parti pour telle ou telle dénomination nous allons préciser tout d'abord la terminologie que nous utilisons dans ce travail, à l'aide des fig.1,2 et 3 figures 1, 2 et 3.

En nous rapportant au système très général lame d'air biseau (fig.1) qui est commun à tous ces instruments nous avons :

- la lumière, qui est l'orifice de sortie du jet d'air,
- le biseau, paroi placée sur le trajet de la lame d'air, (le plus souvent biseauté, d'où son nom).

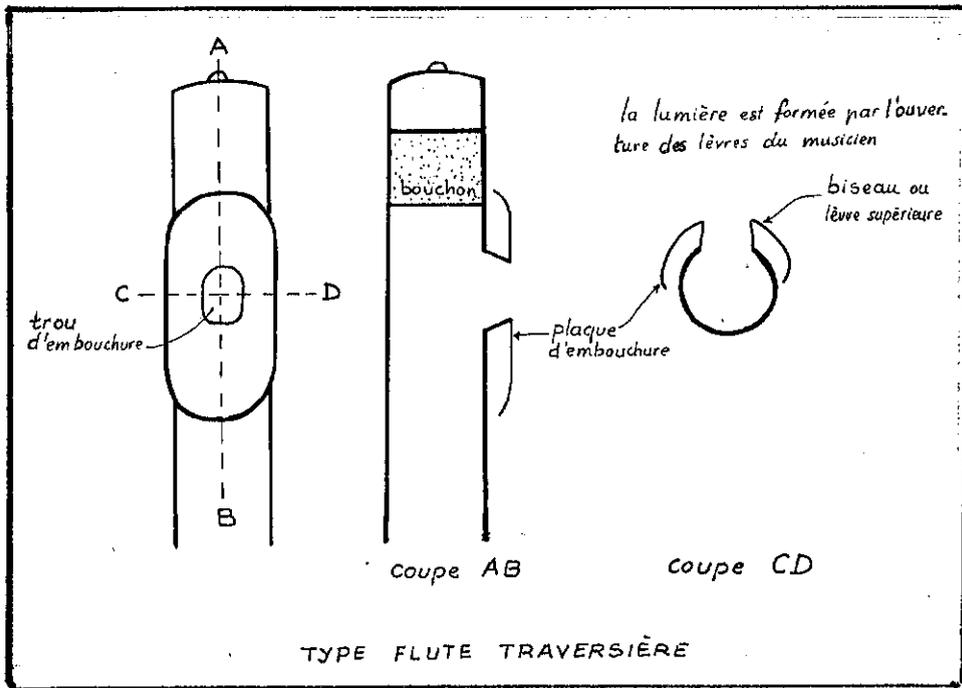
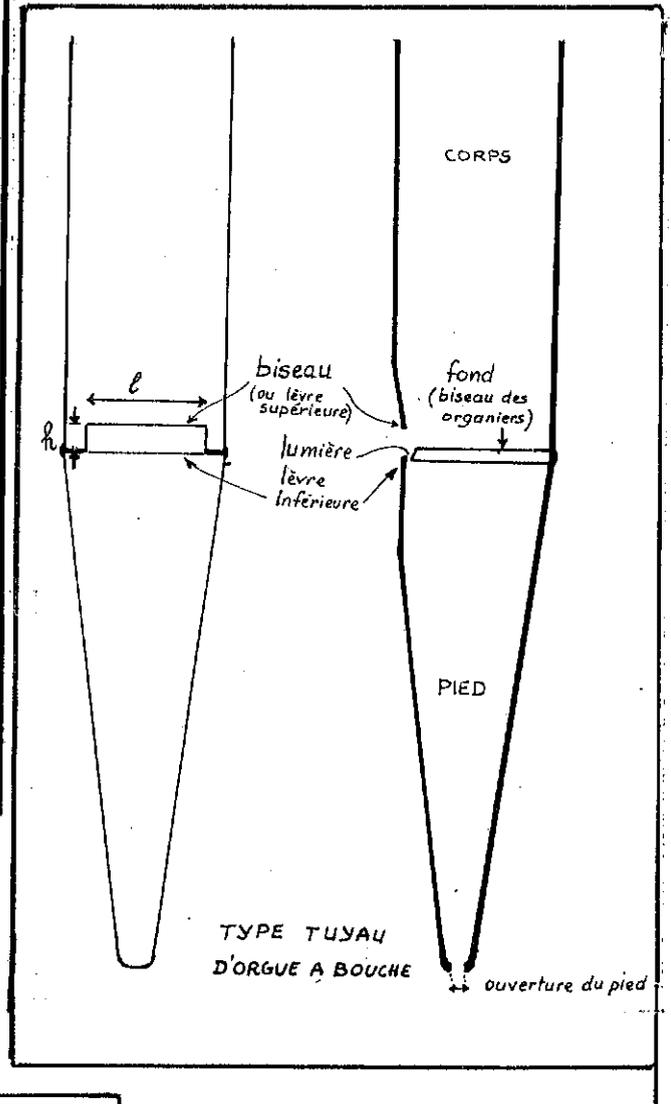
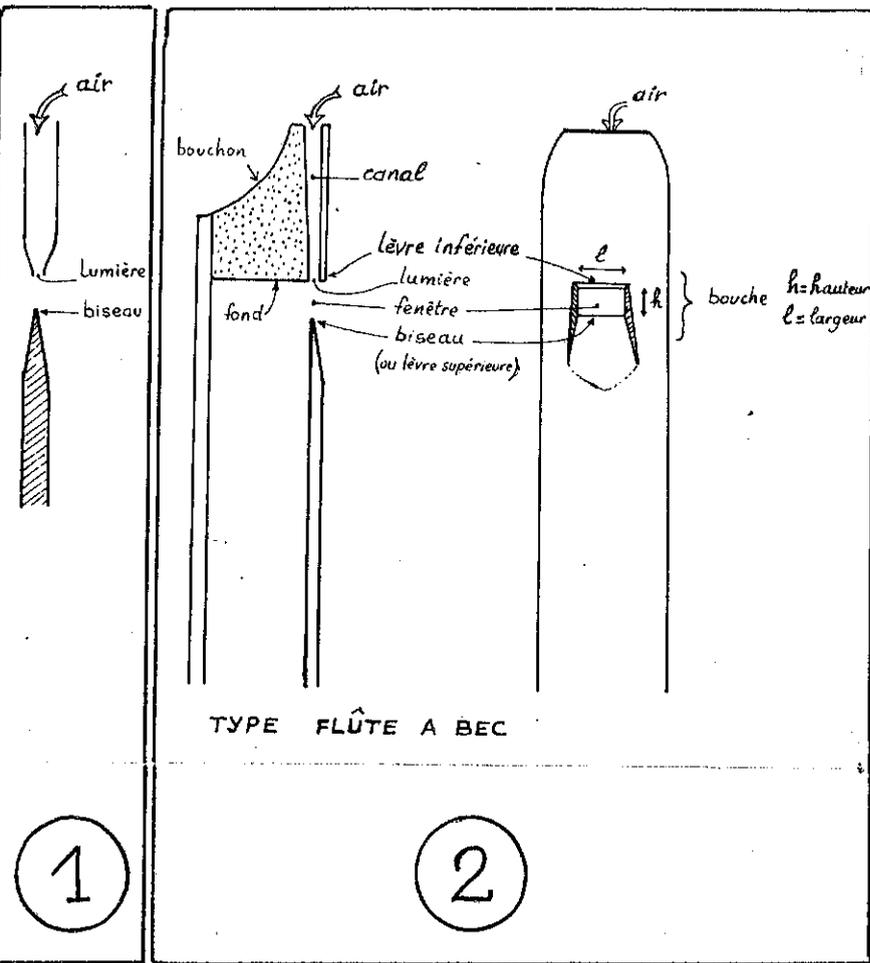
Dans les instruments de musique, la lumière est généralement un rectangle droit ou curviligne, et l'on distingue le bord situé du côté extérieur du tuyau, la lèvre inférieure, du bord intérieur appelé le fond (formé par le bouchon dans la flûte à bec). Remarquons que dans le cas de la flûte traversière, (fig.4) ces deux derniers termes ne sont pas très heureux puisque la lèvre inférieure est en fait la lèvre supérieure du musicien et le fond, la lèvre inférieure du musicien (!) Malgré cet inconvénient, nous adopterons cette terminologie, cohérente du point de vue du fonctionnement physique.

§ 1.08 - Définitions de quelques termes

PARTIEL - Ce mot à deux sens différents :

- 1) Composante quelconque d'un son; ex : partiel du son de bouche. Dans le cas particulier où les fréquences des partiels sont des multiples entiers de la fréquence du partiel le plus grave on emploie le terme harmonique.

...../



- 2) Fréquence propre d'un système sonore, correspondant à un mode de vibration donné;
ex : le partiel 3 du tuyau. Dans ce cas, le partiel a généralement ses propres harmoniques.

HARMONIQUES - Composantes dont les fréquences sont des multiples d'une fréquence de base appelée fondamentale ou harmonique 1.

FONDAMENTAL - Ce terme a aussi deux sens différents :

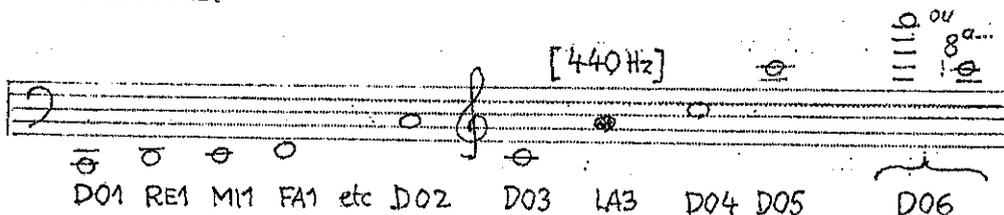
- 1) La première composante d'une série harmonique (synonyme de harmonique 1).
- 2) Son le plus grave que peut émettre un tuyau. (Sens emprunté au vocabulaire des musiciens). Par extension on appelle " fondamentaux " d'un instrument à trous latéraux tous les sons que l'on peut produire en régime 1, en utilisant les différentes combinaisons de doigtés.

REGIMES - D'une façon générale, mode de fonctionnement d'un système sonore. Le passage d'un régime à un autre suppose un saut, une discontinuité de fréquence.

Selon BOUASSE (3, T1 § 96) on distingue, pour les tuyaux à embouchure de flûte, le régime buccal et le régime normal (cf. § 2.09) qui correspondent chacun à un mode d'entretien du tuyau bien défini. La bouche ou le tuyau isolé possèdent également en propre plusieurs modes de fonctionnement que l'on nomme aussi " régimes ", ce qui peut créer quelques confusions de langage.

§ 1.09 - Fréquences - Noms des notes et des octaves

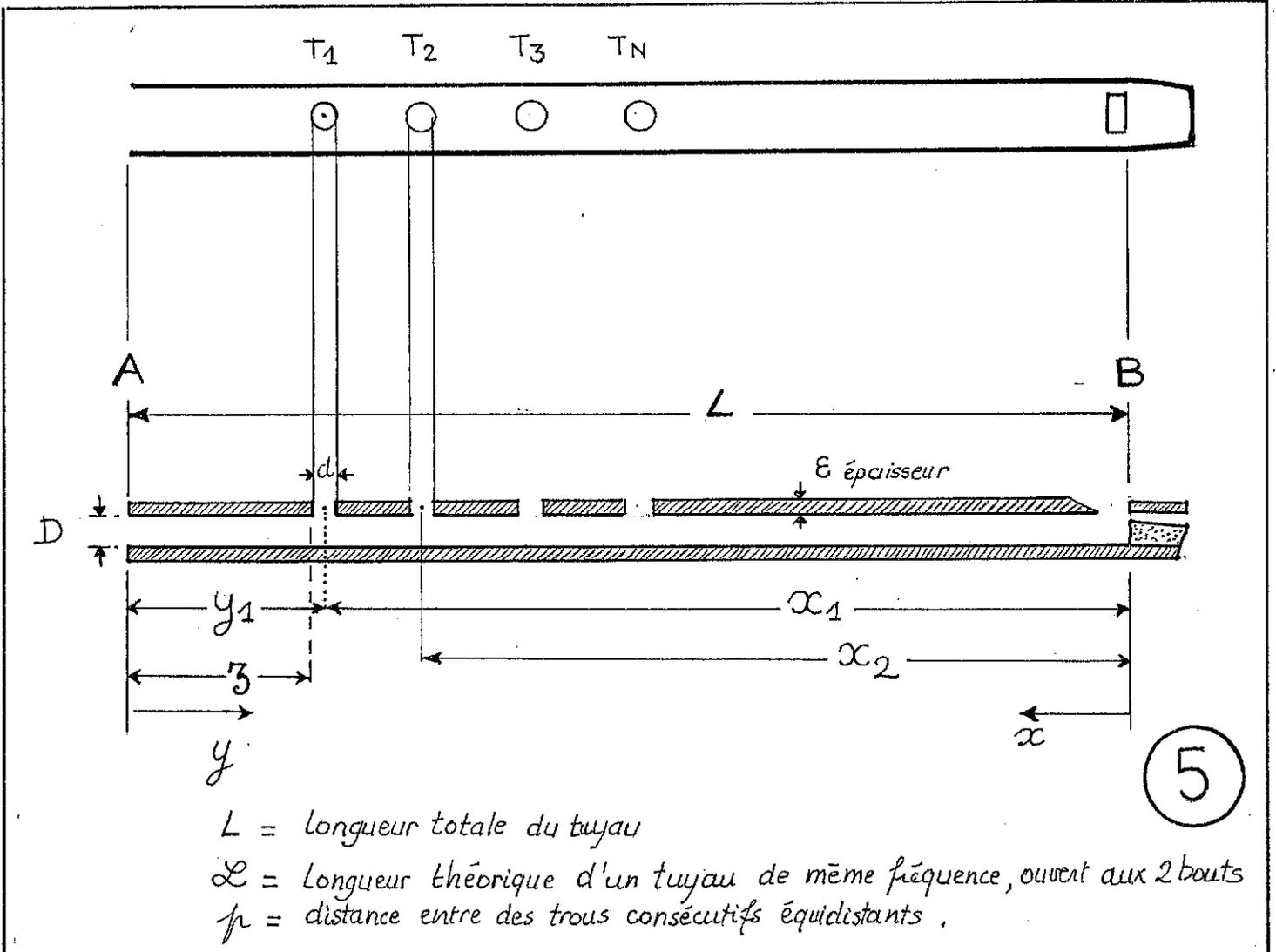
Nous employons les noms de notes traditionnels en France, DO, RE, MI, FA, SOL, LA, SI, l'indice précisant l'octave dans laquelle on se trouve, comme l'indique le schéma ci-dessous.



Pour des raisons de simplicité et de clarté nous écrirons les noms de notes en majuscule, l'indice étant sur la même ligne.

Notre échelle de référence est celle du tempérament égal avec pour note étalon LA3 = 440 Hz. [Désignée par A₄ aux U.S.A. et a¹ en Allemagne]. Rappelons

...../



5

Représentation des doigts :

1 2 3 4 5 6

← Numéro des trous

● ● ○ ● ● ∅

← Etat des trous

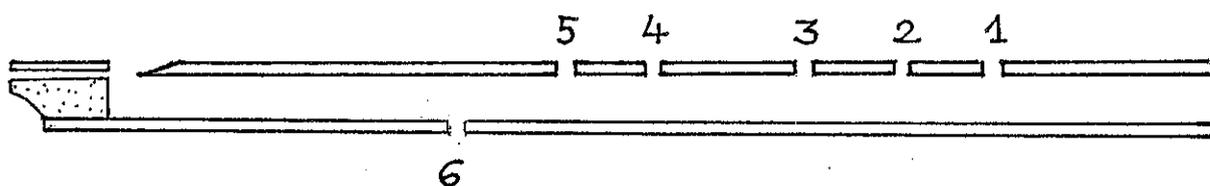
○ trou ouvert (débouché)

● trou fermé (bouché)

∅ trou partiellement ouvert.

6

Numérotation des trous : en partant de l'extrémité opposée à la bouche



enfin que le dièse (\sharp) élève une note donnée d'un demi-ton et que le bémol (\flat) l'abaisse d'un demi-ton.

§ 1.10 - Intervalles - Savarts et Cents

Pour diverses raisons :

- de tradition : la quasi-totalité des ouvrages d'acoustique écrits en langue française emploient le Savart,
- d'adéquation à la physiologie : le savart est le plus petit intervalle perceptible mélodiquement,
- pratiques : on trouve instantanément la valeur de l'intervalle en savarts entre deux fréquences avec la règle à calculer,

nous emploierons ici cette unité.

$$\text{On a : Intervalle en savarts} = 1000 \log_{10} \frac{N_1}{N_2}$$

N_1 et N_2 étant les fréquences des deux sons de l'intervalle considéré.

Dans la gamme tempérée qui nous sert de référence on a :

- 1 octave = 301,03 savarts, ou 300 pour simplifier
- 1 ton = 50 savarts
- 1/2 ton = 25 savarts.

Rappelons enfin qu'un savart vaut environ 4 cents.

$$\text{Plus exactement : 1 savart} = \frac{1200}{\log_{10} 2 \times 1000} \text{ cents} = 3,986 \text{ cents.}$$

§ 1.11 - Désignation conventionnelle de certaines parties du tuyau

fig.5

On a porté sur la figure 5 les principales notations employées dans ce travail, concernant le tuyau, les trous.

fig.6

La numérotation des trous commence à partir de l'extrémité opposée à la bouche (fig.6). Il n'y a pas de règle usuelle en ce domaine.

CHAPITRE III

MODES D'EXCITATION DES TUYAUX A EMBOUCHURE DE FLUTE

§ 1.12 - Tuyaux utilisés

La plupart des expériences sur les tuyaux cylindriques ont pu être faites avec des tubes plastiques cylindriques de divers calibres (diamètres de 6 à 35 mm) aimablement fournis par le Centre d'Etude des Matières Plastiques. Les matières plastiques offrent l'avantage de se travailler facilement, de pouvoir être collées, et pour certaines, d'être transparentes. Le seul inconvénient que nous avons rencontré est, dans certains cas, l'ovalisation de la section qui peut atteindre 1 mm pour un diamètre moyen de 20 mm.

Pour les expériences avec des tuyaux coniques nous avons réalisé, toujours au CEMP, des troncs de cône " bobinés " en tissu de fibre de verre appliqué sur mandrin d'acier, badigeonnés d'araldite.

Etude des trous :

Dans le but de réaliser un tuyau muni de trous de dimension et de place variables nous avons utilisé deux tubes d'acier de faible épaisseur ($\epsilon = 0,25$ mm) et de diamètre légèrement différent, de façon que l'un coulisse dans l'autre au plus juste. *Le tuyau intérieur possède une fente longitudinale de 5 mm de large, sur toute sa longueur.* Le tuyau extérieur a ensuite été découpé en rondelles de 5, 10 et 20 mm. L'étanchéité des rondelles jointives était assurée par du ruban adhésif et de la pâte à modeler. (cf fig. 16 planche 36)

Nous avons pu disposer aussi de quelques tuyaux d'orgue provenant de la reconstitution de l'orgue hydraulique faite par le Dr PERROT ainsi que de tuyaux fournis par Mr WALTHER (Muhleisen).

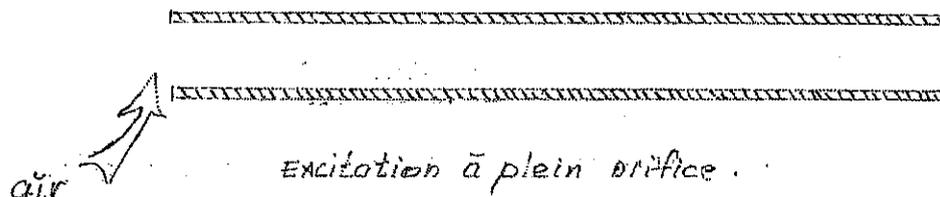
1°) Excitation par le moyen d'un jet aérien

§ 1.13 - Tuyau sans bouche

On peut exciter un tuyau " à plein orifice " en soufflant légèrement dans le plan de l'une des extrémités couvertes. On entend ainsi un son " chuchoté " compar-

...../

tant pratiquement tous les partiels du tuyau.



A l'aide d'un ajutage convenablement orienté et en réglant la pression, on peut émettre un partial isolément, mais tant que l'extrémité reste entièrement découverte l'excitation est assez critique.

§ 1.14 - Tuyaux à bouche

Chaque fois que cela était possible nous nous sommes efforcée d'expérimenter dans les conditions normales de jeu, c'est à dire en soufflant dans l'instrument muni d'une bouche.

Il faut dans ce cas prendre quelques précautions : jouer l'instrument pendant 4 à 5 mn afin qu'il se stabilise en température, et vérifier fréquemment que le canal (dans le cas d'une flûte à bec) n'est pas obstrué par les gouttes provenant de la condensation de l'eau sur les parois. Avec un peu d'entraînement on parvient à un bon contrôle du souffle.

§ 1.15 - Emploi de l'air ou de l'azote comprimé

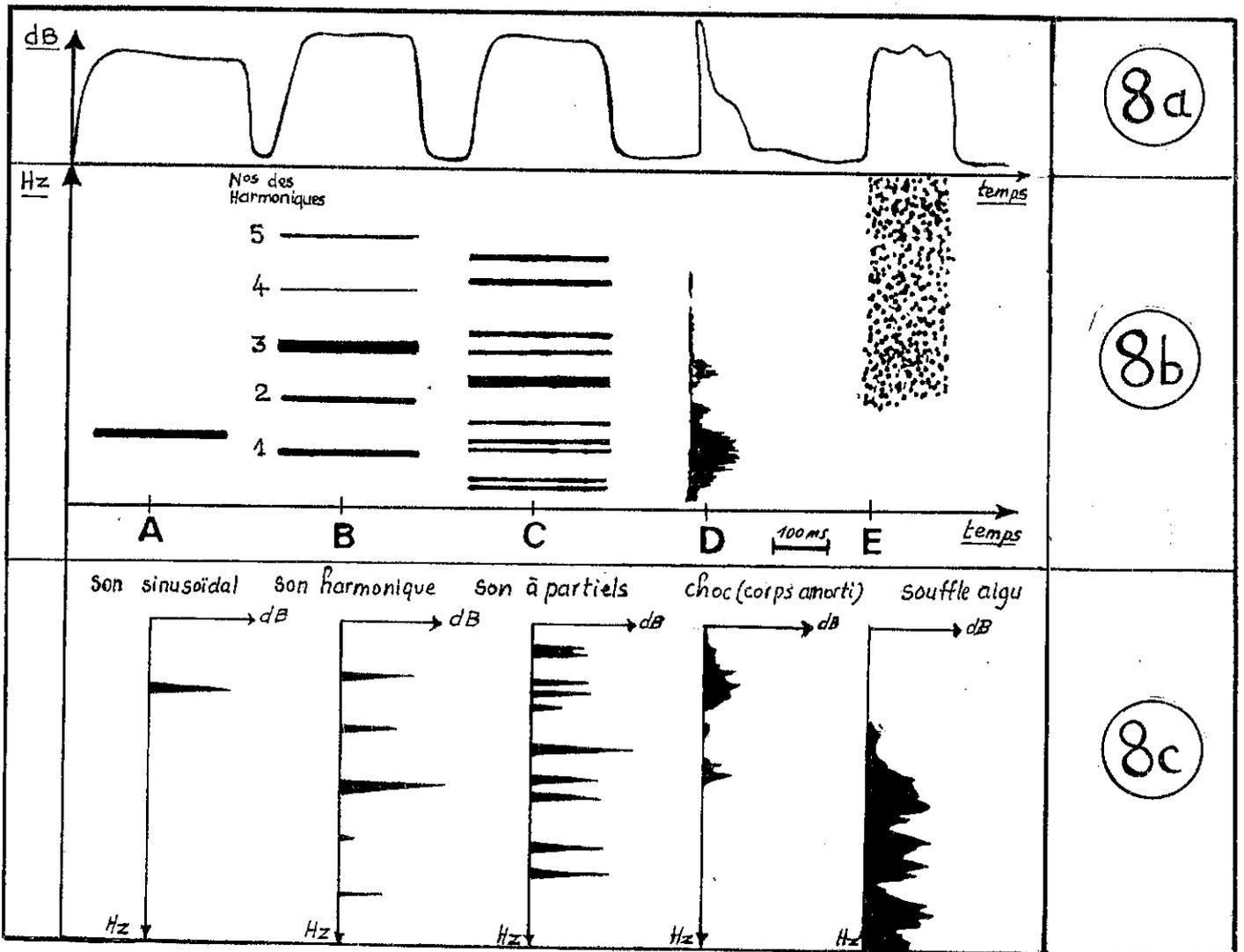
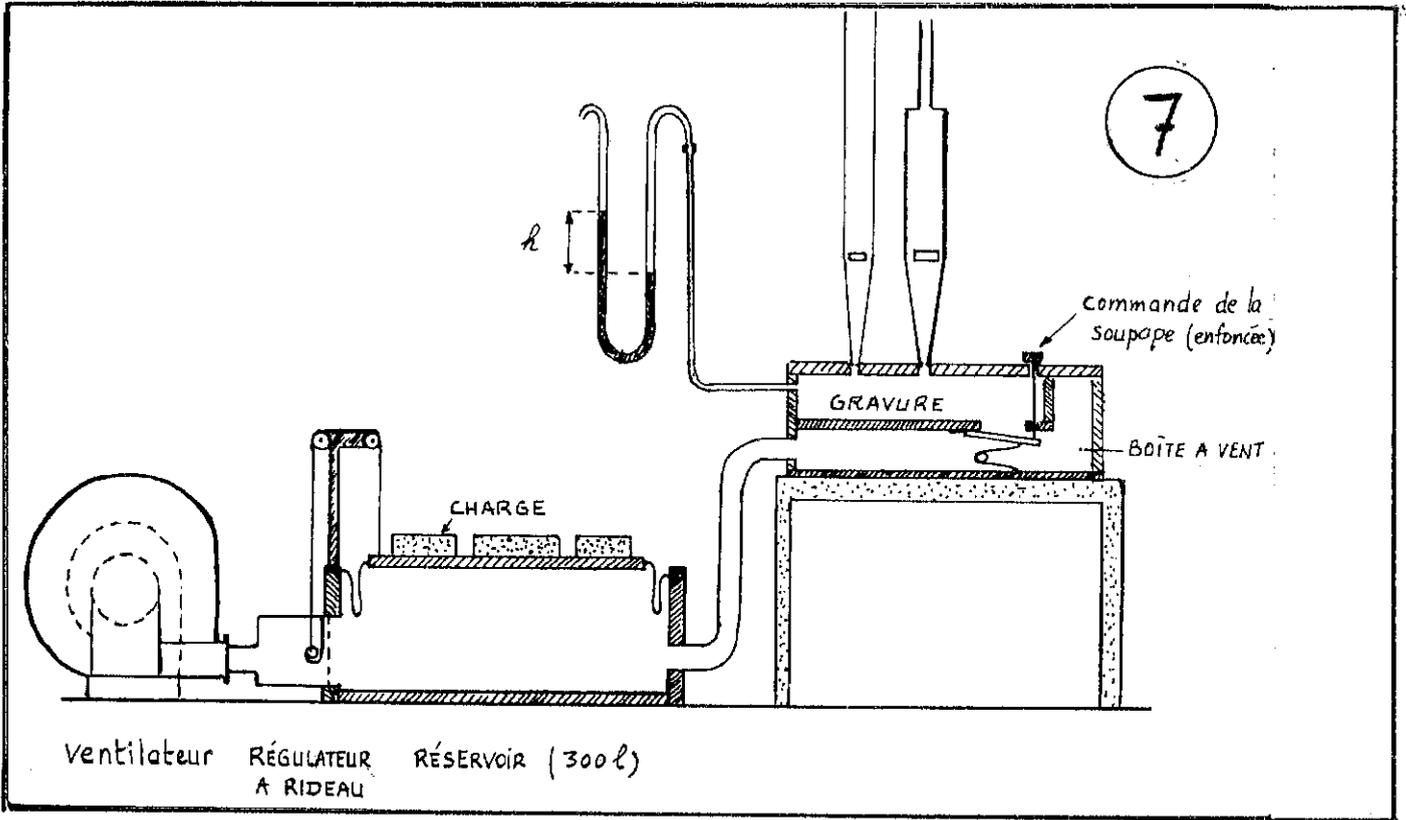
Dans le but de faire certaines mesures précises nécessitant une pression très stable pendant quelques secondes, nous avons employé du gaz comprimé, en l'occurrence l'azote dont la densité est voisine de celle de l'air, et qui est d'une utilisation facile. Nous avons pu disposer d'un double détendeur pour réaliser les faibles pressions nécessaires pour alimenter les flûtes (de 0,2 à 40 cm d'eau).

Nous avons également utilisé l'air comprimé du réseau pour l'étude des trous réglables.

§ 1.16 - Etude des tuyaux d'orgue

L'excitation des tuyaux d'orgue demande une assez grande quantité d'air à pression constante. Dans un premier temps nous avons construit un petit réservoir de capacité variable alimenté par l'air comprimé du réseau et relié à un sommier rudi-

...../



mentaire muni d'une gravure. Par la suite nous avons pu utiliser un réservoir de 0,3 m³ muni d'une boîte à rideau, offert par la maison EUISSEAU. Il est alimenté par un ventilateur silencieux.

On règle facilement la pression de l'air fourni par le réservoir en modifiant la charge placée à sa partie supérieure (cf. Fig.7).

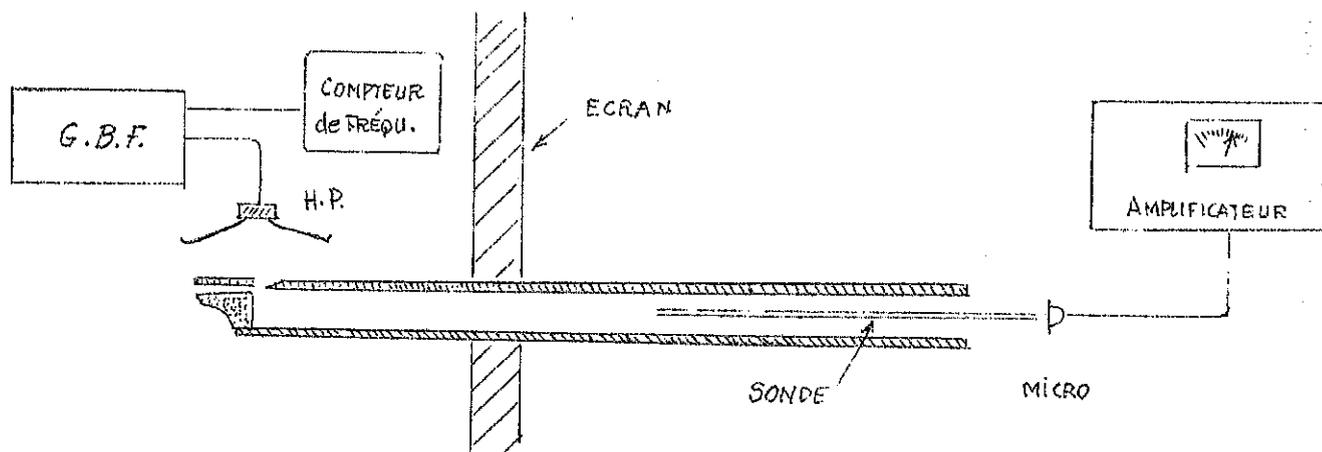
§ 1.17 - Etude de la flûte traversière - Embouchure réglable.

Pour l'étude des paramètres de l'excitation à la flûte traversière nous avons pu faire réaliser au laboratoire de Mécanique de St-Cyr-l'Ecole un dispositif permettant de diriger sur le biseau de la flûte un jet dont on repère l'orientation et la distance par rapport au biseau.

2°) Excitation par haut-parleur

§ 1.18 - Recherche des résonances

Le montage expérimental est représenté par le schéma ci-dessous



En variant continûment la fréquence du générateur de fréquence (G.B.F.) on détecte sur le VU-mètre de l'amplificateur les maxima correspondant aux fréquences propres du tuyau. Au besoin, on place la sonde aux ventres de vitesse, où l'intensité est la plus grande. Pour chaque maximum on lit instantanément la fréquence sur le compteur.

Nous avons pris soin de toujours prendre une sonde petite par rapport au diamètre du tuyau (1/10) afin de minimiser les perturbations que sa présence pourrait entraîner. Dans le cas d'un tuyau percé d'un trou latéral, la sonde permet de dépar-

tager plus facilement les fréquences propres de la portion de tuyau comprise entre l'embouchure et le trou, de celles du bout-mort (portion de tuyau située au-delà du trou).

Cette méthode est classique en acoustique. Elle permet d'obtenir des résultats d'une précision suffisante ici bien que la détermination du maximum comporte souvent une part d'incertitude (courbe en cloche). En ce qui nous concerne, les conditions d'excitation sont assez éloignées de la réalité instrumentale. Nous n'avons utilisé cette méthode que lorsque nous voulions comparer nos résultats avec ceux d'autres auteurs ayant procédé de cette façon ou lorsque l'excitation aérienne était difficile.

CHAPITRE IV

APPAREILS DE MESURE UTILISES

1°) MESURE DES GRANDEURS PHYSIQUES

§ 1.19 - Mesures de la pression

PRESSIION STATIQUE - Nous avons utilisé les manomètres classiques à eau ou à alcool, ce dernier étant plus adapté aux très faibles pressions (de 1 à 40 mm d'eau). On effectue la prise de pression à l'aide d'un tube de plastique souple de petit diamètre (environ 3 mm), introduit dans la bouche du musicien ou branché sur le conduit d'alimentation de l'instrument, juste avant l'entrée du bec. Les montages nécessaires pour raccorder à l'alimentation aérienne ^{et} au manomètre des instruments de forme et de dimensions diverses étant quelquefois assez différents, on ne devra pas s'attacher de trop près à la valeur absolue des mesures : c'est plutôt l'allure des variations qui est importante. Par contre, lorsqu'il s'agissait de comparer des instruments nous avons toujours pris grand soin d'opérer dans les mêmes conditions.

PRESSIION DYNAMIQUE - Pour étudier l'évolution rapide de la pression au cours de l'attaque d'une flûte à bec nous avons pu disposer d'un capteur transistor d'un type particulier, le Pitran. La jonction entre la base et l'émetteur est couplée mécaniquement à un diaphragme qui, lorsqu'il est soumis à une différence de pression entraîne une modification importante et réversible du gain du transistor.

Le Pitran transforme une variation de pression (en mm d'eau) en une tension analogue en volts, que l'on peut appliquer à l'entrée d'un oscillographe cathodique. Nous avons employé un modèle fonctionnant dans la gamme de pression de 1 à 180 mm d'eau, dont le temps de montée est tout à fait négligeable (10 microsecondes). Le capteur a été fixé sur un tuyau raccordant l'entrée du bec à la bouche du musicien.

§ 1.20 - Mesure du débit

L'appareil employé est un rotamètre que l'on intercale entre la source d'air comprimé et l'instrument. Il est étalonné pour mesurer des débits compris entre 2 et 12 l/mn de gaz ammoniac (NH₃). Nous n'avons utilisé cet appareil que de façon relative,



pour établir des comparaisons entre les débits de diverses flûtes à bec.

2°) MESURES DES GRANDEURS ACOUSTIQUES

Le son a trois dimensions : la hauteur, l'intensité et la durée. On dispose aujourd'hui d'appareils électroniques permettant de mesurer soit l'une de ces grandeurs soit les variations concomitantes de deux d'entre elles, ou même des trois grandeurs simultanément. Nous allons mentionner maintenant les principaux appareils de mesure que nous avons utilisé lors des expériences.

§ 1.21 - Mesure de la fréquence

Nous disposons de deux appareils :

- 1°) Le fréquencemètre qui donne directement la fréquence en Hz mais ne peut mesurer que des sons stables, dépourvus d'harmoniques. Il convient dans le cas d'excitation par haut-parleur.
- 2°) Dans tous les autres cas nous avons utilisé l'accordeur électronique (Sté SABRUS), de maniement simple et rapide et de précision suffisante en ce qui nous concerne. La mesure est fournie sous forme d'écart en savarts par rapport à l'un des 11 sons de la gamme tempérée de référence (base $LA_3 = 440$ Hz). L'appareil est particulièrement bien adapté aux sons des octaves 3 et 4 mais on peut toujours amener un son quelconque dans cette zone en usant de transpositions au magnétophone.

§ 1.22 - Mesure de l'intensité

Nous avons utilisé un décibel-mètre étalonné du commerce, (Général-Radio), en lisant les résultats dans l'échelle C. (Mesures " physiques " c'est-à-dire sans courbe de pondération). Dans les cas où nous avons voulu faire un parallèle entre l'évolution spectrale et l'évolution de l'intensité en fonction du temps nous avons aussi utilisé le sonographe.

§ 1.23 - Analyse spectrale. Le sonographe

On sait mesurer la fréquence et l'intensité depuis de nombreuses années. Les appareils modernes apportent tout au plus une précision et une rapidité de mesure plus grandes. Il n'en est pas de même en analyse spectrale où l'appareillage est encore en pleine évolution. Un grand nombre des résultats originaux de ce travail sont

..../

due au fait que nous avons pu disposer d'analyses montrant l'évolution spectrale des phénomènes dans le temps. L'appareil qui fournit ces analyses est le sonographe.

Le sonographe (ou SONA-GRAPH)* est un spectrographe acoustique fournissant sur papier l'analyse d'une séquence sonore de 2,4 secondes selon 4 modes principaux :

- 1) Evolution simultanée de la fréquence et de l'intensité en fonction du temps. C'est le sonogramme proprement dit. La fréquence est en ordonnée, selon une échelle linéaire; le temps en abscisse; l'intensité est traduite par la largeur et la noirceur des traits.
- 2) Evolution de l'intensité globale en fonction du temps. (courbe de niveau). L'intensité se lit en ordonnée, avec une dynamique de 24 dB.
- 3) Spectre. Ce mode d'analyse permet la mesure de l'intensité (en abscisse) en fonction de la fréquence (en ordonnée) à des instants choisis.
- 4) " Contour-display " - Même type d'analyse qu'en 1) mais l'intensité est figurée sous forme de courbes isodynamiques reliant les points d'égale intensité par échelons de 6 dB.

fig.8

La fig. 8 représente l'analyse de quelques signaux types : son sinusoïdal, son harmonique, son à partiels, choc sur un corps amorti et bruit d'écoulement. On voit de haut en bas : la courbe de niveau (a), le sonogramme proprement dit (b), les spectres (c) pris aux points A, B, C, D, E. Dans la plupart des cas le sonogramme seul nous donne tous les renseignements utiles.

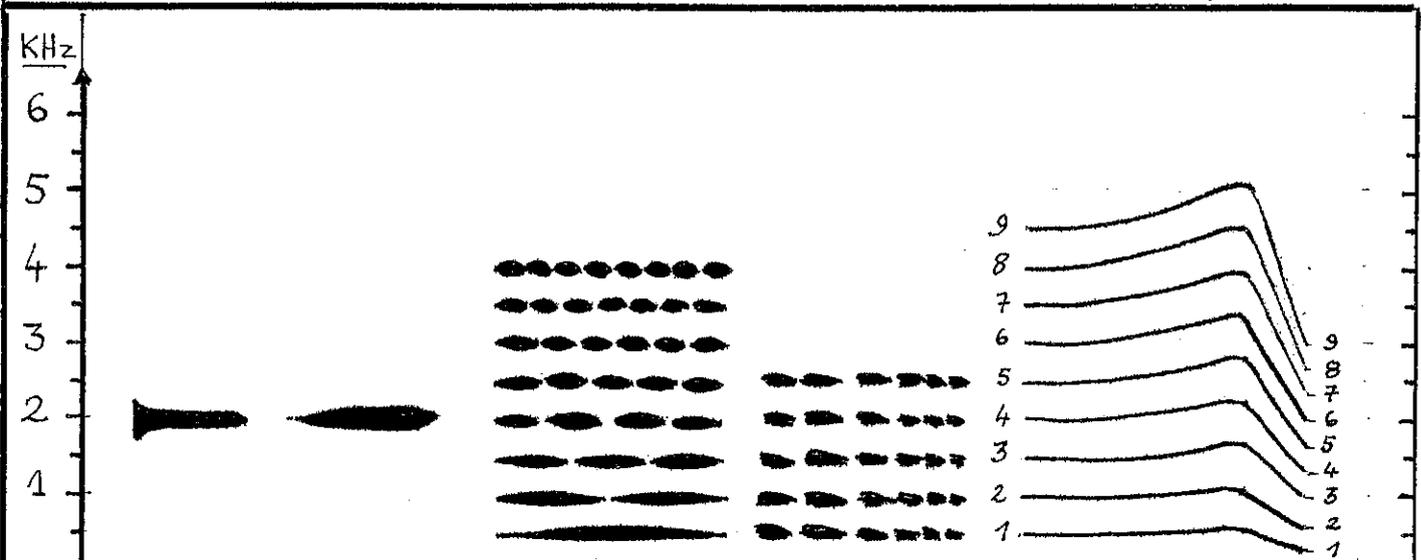
fig.9

La figure 9 montre :

- a) La représentation de variations d'intensité à l'attaque, au cours de battements ou de râclage, et un son harmonique dont la hauteur monte continûment d'un ton $(\frac{9}{8})$ et redescend rapidement à la quinte inférieure de la fréquence de départ $(\frac{2}{3})$
- b) Quelques exemples de sons de combinaison entre 2 sons sinusoïdaux puis entre un son sinusoïdal et un son harmonique. Ces phénomènes sont très fréquents et très importants au moment de l'attaque du tuyau ou lorsque le son de la bouche persiste dans le son normal du tuyau.
- c) Deux exemples d'attaque du son montrant des allures types, et les 3 premiers partiels d'un tuyau ouvert aux deux bouts. Chaque partiel a ses harmoniques : noter

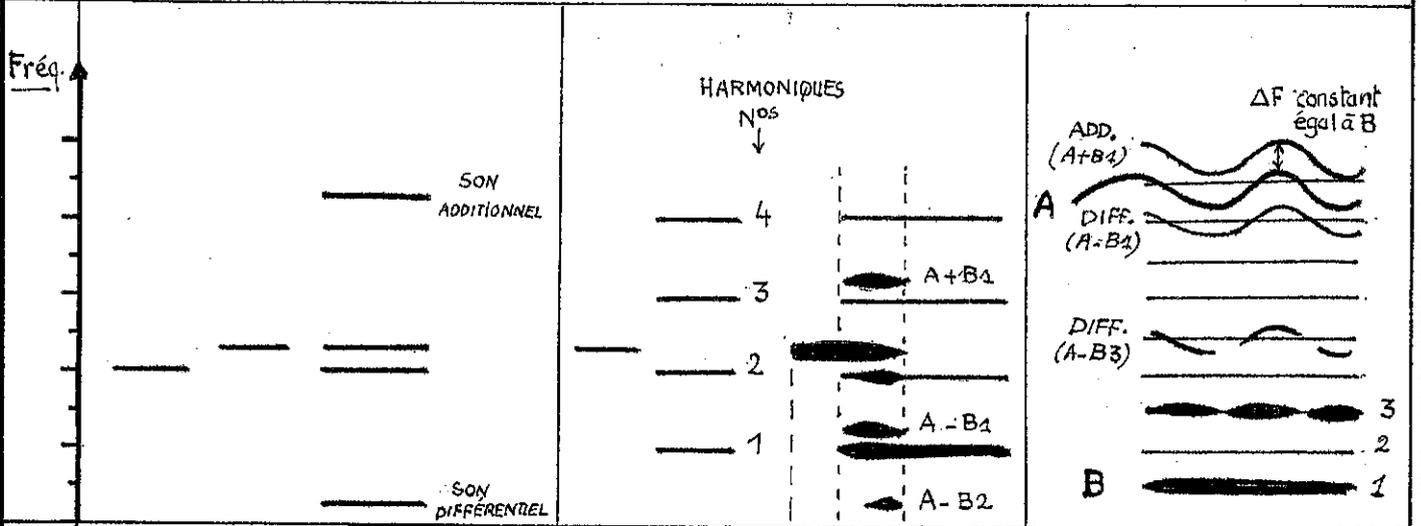
...../

(*) Appareil construit par KAY-ELECTRIC Cie - U.S.A.
ELEMETRICS



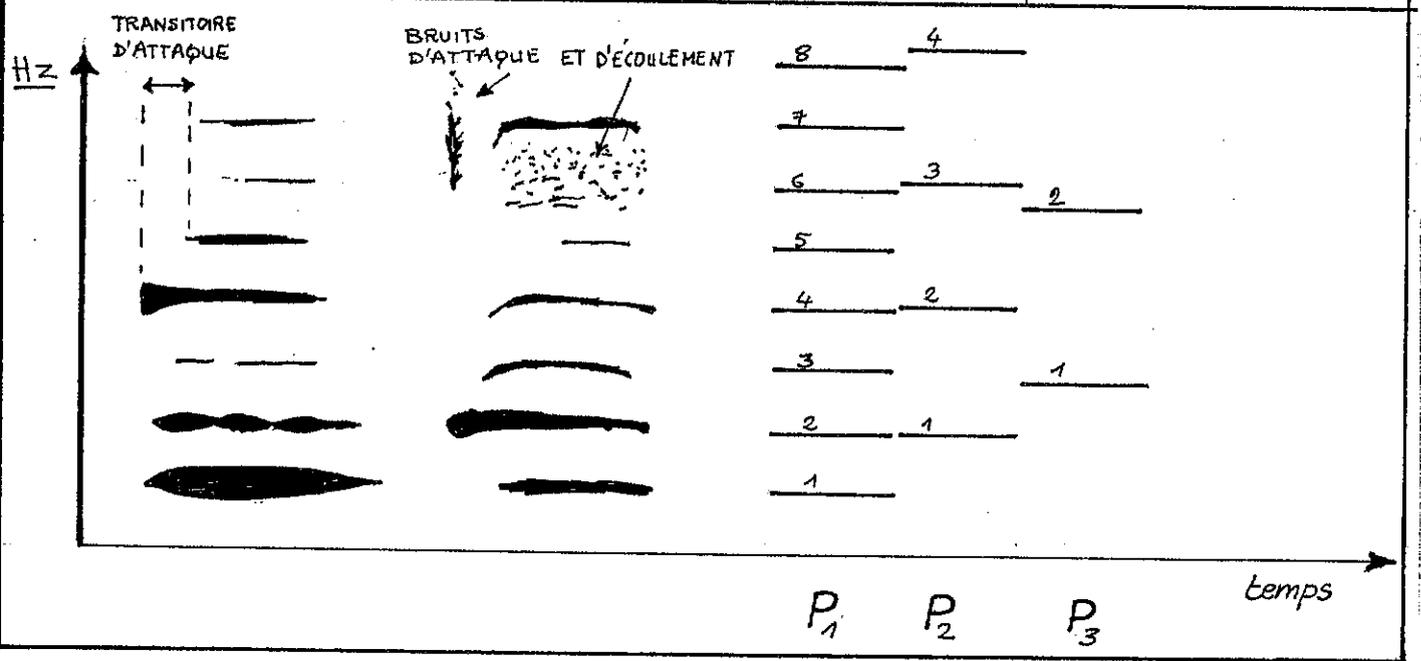
9a

attaque brutale (sons sinusoïdaux) attaque progressive Battements la rapidité croît avec la fréquence Raclement interruption commune à toutes les composantes Son harmonique de hauteur variable les variations de fréquence sont plus lisibles sur les harmoniques supérieurs.



9b

A seul B seul A+B A B A | A+B | B Son de bouche interférant avec le son du tuyau



9c

que P2 est plus aigu que l'harmonique 2 de P1 et que P3 est plus bas que l'harmonique 3 de P1. Les écarts apparaissent plus nettement sur les harmoniques élevés.

Par des manipulations diverses : transposition au magnétophone, utilisation de l'agrandisseur d'échelle, tambours de différents diamètres, on peut grossir plus ou moins les échelles de temps et de fréquence, indépendamment l'une de l'autre, et adapter ainsi l'analyse au phénomène que l'on étudie.

Il est possible également de faire l'analyse avec, au choix, un filtre de 10 Hz, 45 Hz, 150 Hz ou 300 Hz. Le filtre de 45 Hz offre le plus souvent le meilleur compromis entre le pouvoir de résolution en temps et celui en fréquence.

fig.10 On montre fig. 10 le sonagramme de l'attaque d'une note de flûte à bec alto (Mib 4) analysée selon deux largeurs de bande 45 Hz en haut, 300 Hz en bas, et suivant divers modes de transpositions.

b) est le sonagramme normal (limite supérieure 8000 Hz, durée totale 2,4 sec.).

En c) le signal a été lu à double vitesse au magnétophone. On obtient ainsi une meilleure définition en fréquence : voir en particulier les composantes encadrant l'harmonique 2 au moment de l'attaque.

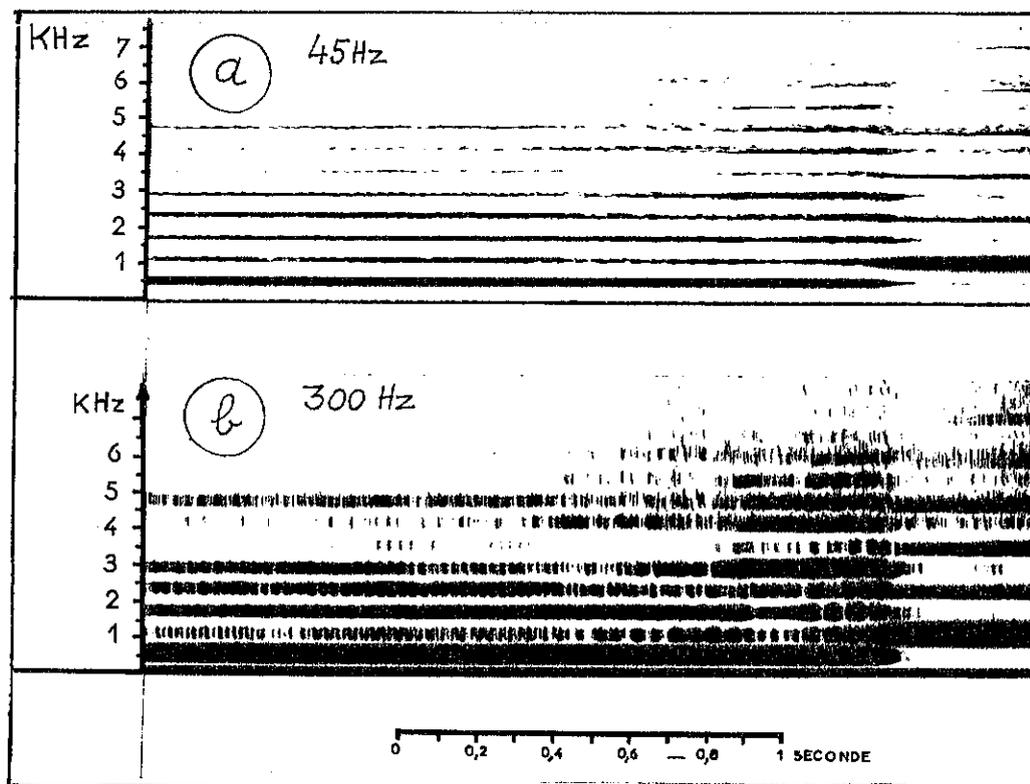
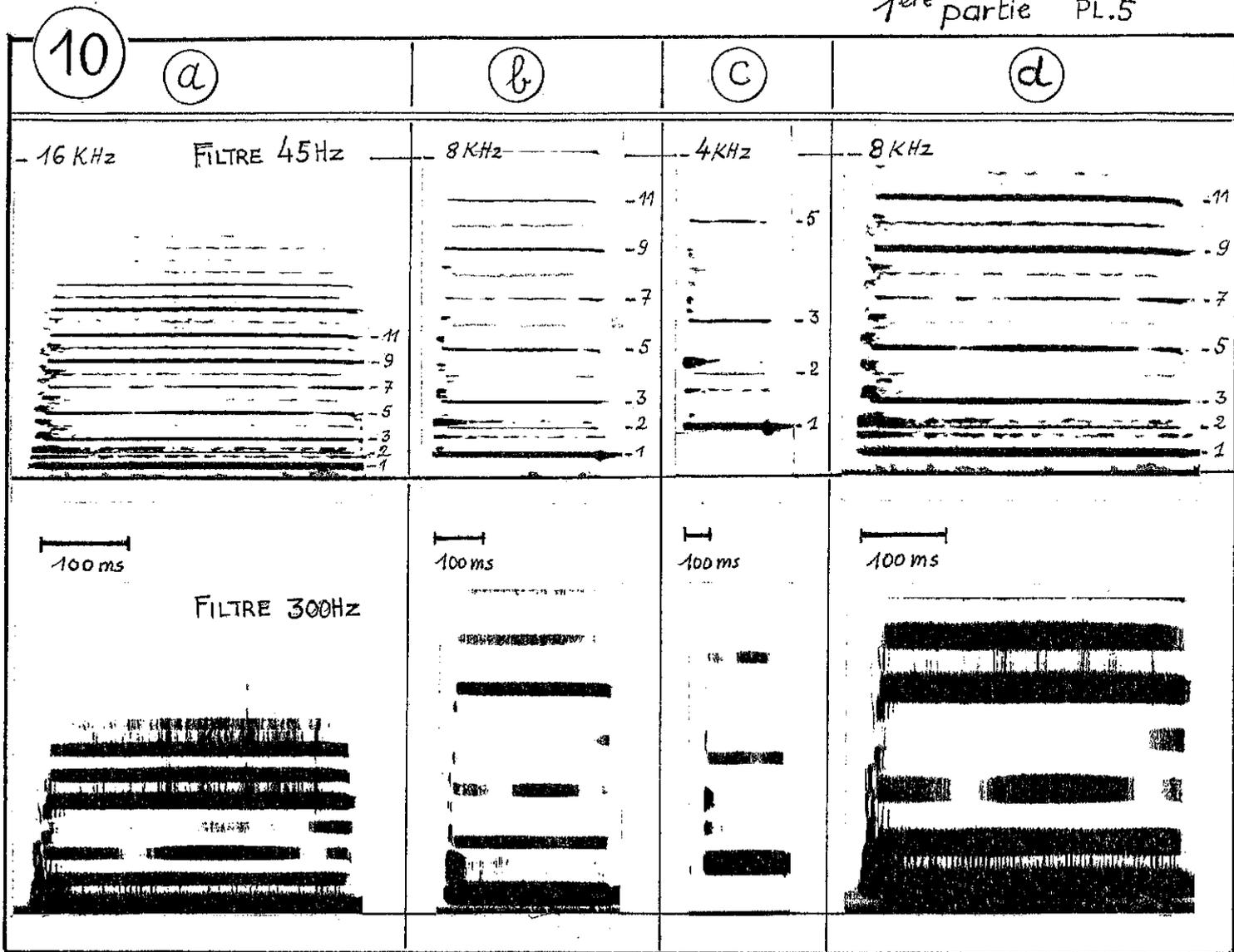
En a) on a procédé à la transposition inverse (lecture à vitesse moitié) ce qui permet d'apprécier avec plus de précision les durées séparant l'arrivée des harmoniques. Du même coup la limite supérieure d'analyse est étendue à 16000 Hz mais l'inscription des fréquences est évidemment très comprimée.

Un bon compromis pour le son étudié ici est le mode d). On opère comme en a) mais en agrandissant l'échelle des fréquences au moment de l'analyse par le moyen d'un branchement particulier (" Scale magnifier ").

fig.11 Lorsqu'on opère avec la largeur de bande 300 Hz on peut mieux mettre en évidence les fluctuations rapides d'intensité. Voir fig.10 harmonique 5, et fig.11 les battements complexes se produisant à la transition de deux régimes.

§ 1.24 - Avantages et inconvénients de l'emploi du sonographe

Le sonographe, conçu et mis au point pour l'étude de la parole mais employé aussi en d'autres domaines de l'acoustique, n'est pas un appareil de mesure au sens où on l'entend généralement.



11

L'inscription qui se fait par étincelage, est assez floue et ses caractéristiques dépendent beaucoup du réglage de la pointe (raideur, force d'appui). Mais avec un peu d'habitude on arrive très bien à surmonter ce problème et on obtient des documents parfaitement reproductibles.

Dans le premier type de document l'intensité n'est que " liée " au noircissement du papier. Nous avons vu que les autres modes d'analyse offriraient plus de précision, et au besoin on peut toujours avoir recours à un appareil plus approprié.

Depuis maintenant 12 ans que nous utilisons cet appareil en collaboration avec E. LEIPP nous sommes convaincue de l'intérêt de ce type d'analyseur dans notre domaine d'étude. Les sons produits par les instruments de musique sont faits pour être entendus. Il importe donc avant tout, que nos appareils d'analyse nous fournissent des documents significatifs, qu'il soit possible d'interpréter en fonction des données perceptives. Comme en ce domaine c'est ce qui change dans le temps qui est important, on comprend l'intérêt d'un appareil qui fournit une sorte de " film visuel " d'une tranche de vie sonore. Si l'oreille appréhende globalement les sons, elle détecte avec beaucoup de finesse les moindres variations de hauteur ou de timbre; de même on peut, au vu du sonagramme repérer les petites fluctuations de fréquence et d'intensité qui sont l'essentiel de l'information perçue. De ce point de vue, l'appareil est donc particulièrement bien adapté : cependant l'interprétation des documents pose encore bien des problèmes car nous sommes loin encore de posséder toutes les données de la psycho-physiologie de la perception.

CHAPITRE V

PRINCIPAUX RELEVÉS EXPERIMENTAUX

Lorsqu'on ne s'intéresse qu'aux fréquences de résonance du tuyau, il est aisé d'utiliser les méthodes classiques d'excitation du tuyau par une source extérieure stable et de mesurer les petites variations de fréquence et d'intensité des partiels avec assez de précision.

Dans le tuyau à bouche qui fait l'objet de notre étude, la fréquence d'un partiel donné varie largement de part et d'autre de la fréquence de résonance du tuyau. Pour une même pression un partiel peut sortir, ou un autre, selon le mode de mise en route du tuyau. On est donc conduit, lors de l'étude expérimentale des tuyaux à bouche à définir des " domaines d'existence ", des " champs de variation " d'un paramètre donné en fonction d'un autre, qui correspondent pour les musiciens à un champ des possibles de leur instrument. A la suite des travaux de M. LEIPP (N° 3) nous adopterons le terme général de " champ de liberté ".

Nous allons exposer maintenant la procédure expérimentale des principaux types de relevés utilisés couramment dans la suite de ce travail.

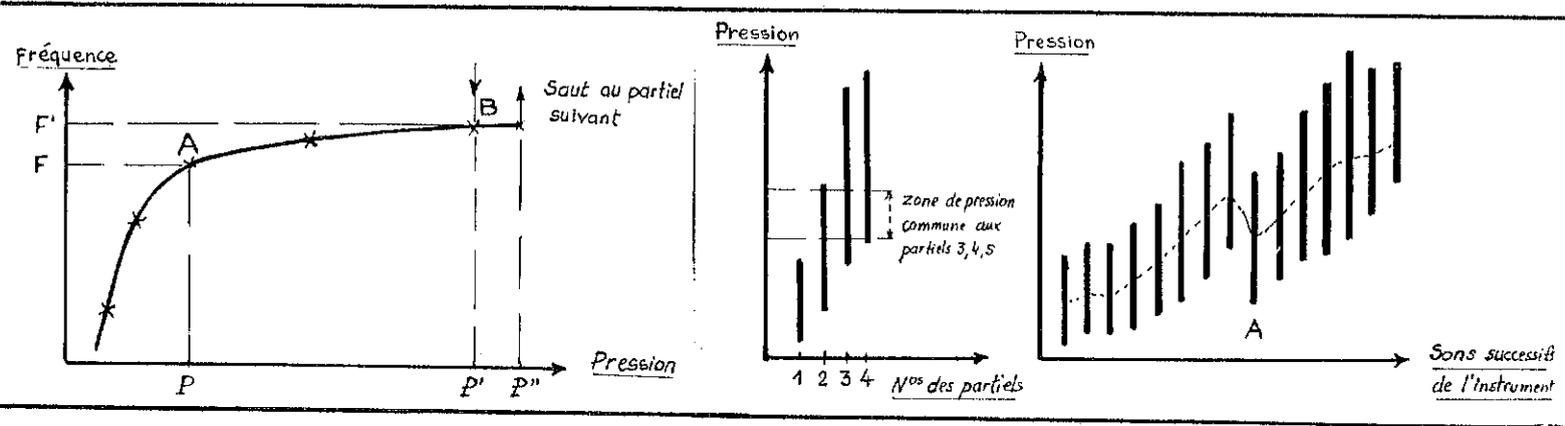
§ 1.25 - Relevé fréquence/pression

On fait varier continûment et graduellement la pression de l'air qui alimente le tuyau à bouche et on relève simultanément la valeur de la pression et celle de la fréquence pour quelques points remarquables jusqu'au moment où le tuyau saute à un autre partiel.

fig.12

On voit fig. 12 l'allure typique d'un tel relevé pour le partiel 1 d'un tuyau. La courbe renseigne sur la zone PP' de pression dans laquelle le partiel est utilisable musicalement. Pour les pressions inférieures à P la fréquence varie très vite avec les changements de pression et l'intensité est d'ailleurs faible. La zone P' P'' a des limites floues. Le partiel existe ou non selon qu'on y entre par pression croissante ou décroissante.

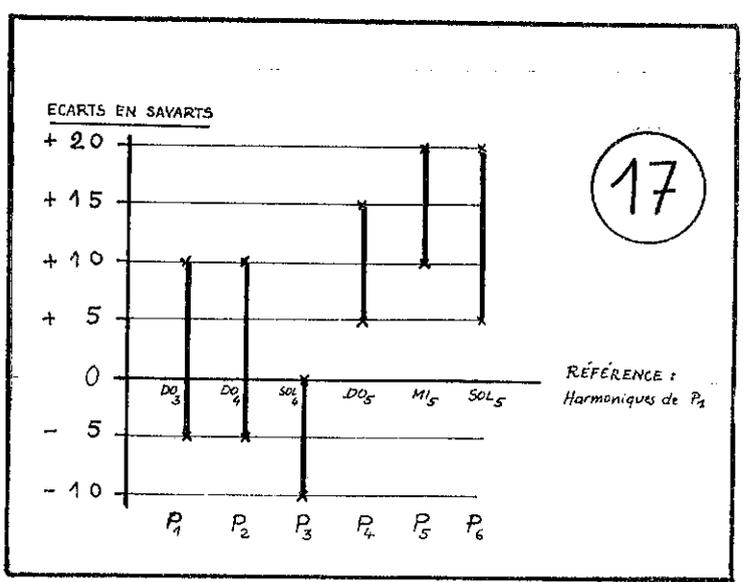
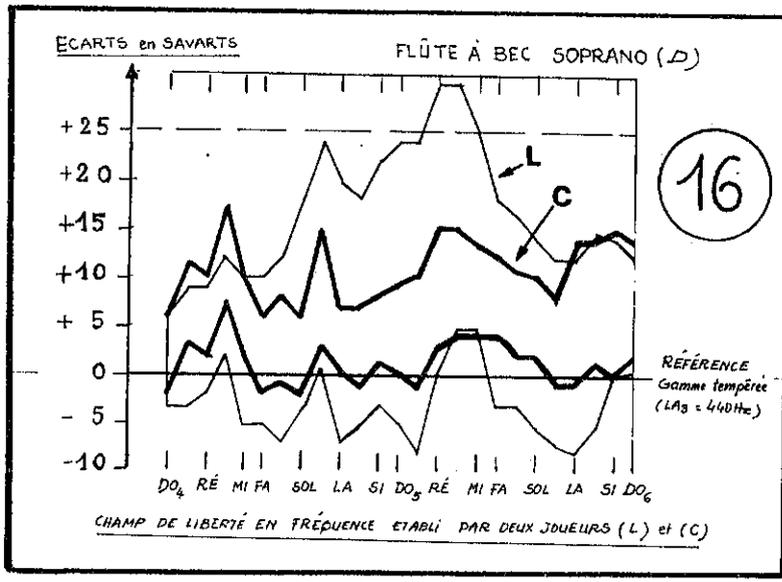
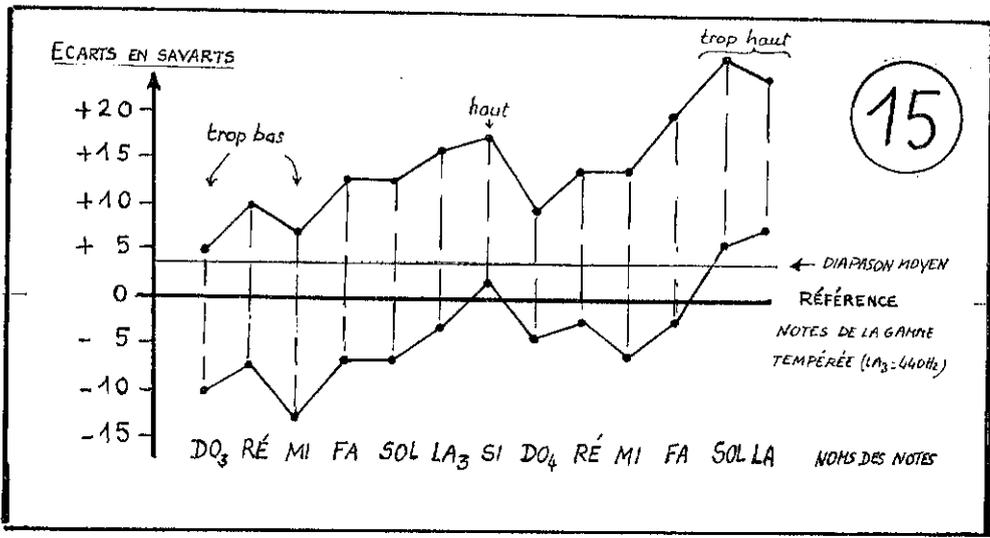
La pente moyenne de la partie AB de la courbe est aussi une donnée intéressante caractéristique de la bouche. Lorsqu'on utilise de l'air comprimé pour alimen-



12

13

14



ter le tuyau on obtient des courbes bien régulières qui permettent de déceler de fines variations de fréquence consécutives à une petite modification du tuyau.

En ce qui concerne les points A et B qui délimitent le champ de liberté en pression (PP') et le champ de liberté en fréquence FF' du partiel, leur position n'est pas rigoureusement définie. Il appartient à l'expérimentateur d'en décider car pour des raisons pratiques il est plus aisé de manipuler des grandeurs numériques définies et de circonscrire d'un trait la zone d'existence d'un partiel sur un graphique.

On voudra donc bien ne pas oublier dans la suite de ce travail que les bornes des champs de liberté ne sont pas des limites précises mais le milieu d'une zone plus ou moins étendue dans laquelle le phénomène change de nature. Nous chercherons à estimer, chaque fois que cela sera utile, l'étendue de cette zone.

§ 1.26 - Champ de liberté en pression des partiels d'un instrument

On détermine pour chaque partiel, par pression croissante puis décroissante la zone PP' dans laquelle il est stable. En portant cette zone en ordonnée et les partiels successifs d'un même doigté en abscisse on peut apprécier l'étendue des zones de pression communes à plusieurs partiels. Dans ces zones, l'un ou l'autre des partiels est également susceptible de sortir selon le mode d'attaque du tuyau (fig.13).

Si l'on dispose maintenant en ordonnées les notes successives d'un instrument on pourra juger de la régularité de la courbe moyenne de pression, propre à l'instrument (fig.14). Sur notre exemple on constate une rupture en A, au passage du régime 1 au régime 2.

§ 1.27 - Champ de liberté en fréquence des partiels

En procédant comme au § 1.25 on relève pour chaque partiel les fréquences F et F' des points A et B (fig.12) que nous exprimons généralement sous forme d'écartés par rapport à une note de la gamme tempérée de référence. On porte donc en abscisse les notes de référence et en ordonnée les écartés en savarts. Puis on relie entre elles les bornes supérieures et les bornes inférieures ce qui met mieux en évidence les irrégularités du champ de liberté, (fig.15) les notes trop hautes ou trop basses. Le champ de liberté en fréquence d'un instrument permet d'estimer sa justesse par rapport à une référence donnée. Si cette référence est la gamme tempérée, l'instrument sera juste si l'on peut tracer une horizontale ne sortant pas de la zone grisée.

On pourra du même coup connaître le diapason de cet instrument.

Enfin l'étendue en fréquence du champ de liberté permet d'apprécier la marge de variation offerte au musicien pour s'écarter de la justesse moyenne, réaliser des attractions ou corriger certaines notes. Nous discutons plus en détail ces problèmes de justesse des flûtes au chapitre III de la 4ème Partie.

REMARQUE : L'établissement du champ de liberté en fréquence d'une flûte demande quelques précautions :

- Il faut tout d'abord chauffer l'instrument pendant 4 à 5 minutes pour qu'il se stabilise en température.

- dans le cas d'une flûte à bec on doit vérifier fréquemment l'état du canal qui a tendance à s'obstruer par condensation de l'eau.

- Le problème le plus difficile réside dans la détermination des limites de chaque son. Car en plus de la notion de stabilité intervient la notion de " qualité " musicale d'un son. Il faut en effet ne représenter que l'étendue en fréquence des sons utilisables. On demande au musicien de monter la fréquence d'une note " jusqu'au point où le timbre n'est plus " bon " à son goût. En ce domaine, les avis varient d'une personne à l'autre, surtout depuis l'utilisation en musique contemporaine de sons que l'on n'ose plus qualifier....

Jouant nous-même de la flûte à bec nous avons fait l'expérience de relever le champ de liberté d'un instrument joué par nous (C) puis par un musicien professionnel (L). On voit (fig.16) que l'estimation de la limite supérieure en particulier varie de façon assez considérable. (L) aura plus de marge pour corriger les défauts de l'instrument que (C). Mais ceux-ci sont bien visible dans l'un comme dans l'autre cas, ce qui montre l'intérêt du champ de liberté. Il est donc important pour comparer valablement les champs de liberté en fréquence de 2 instruments que ceux-ci aient été faits par le même expérimentateur et dans les mêmes conditions de température.

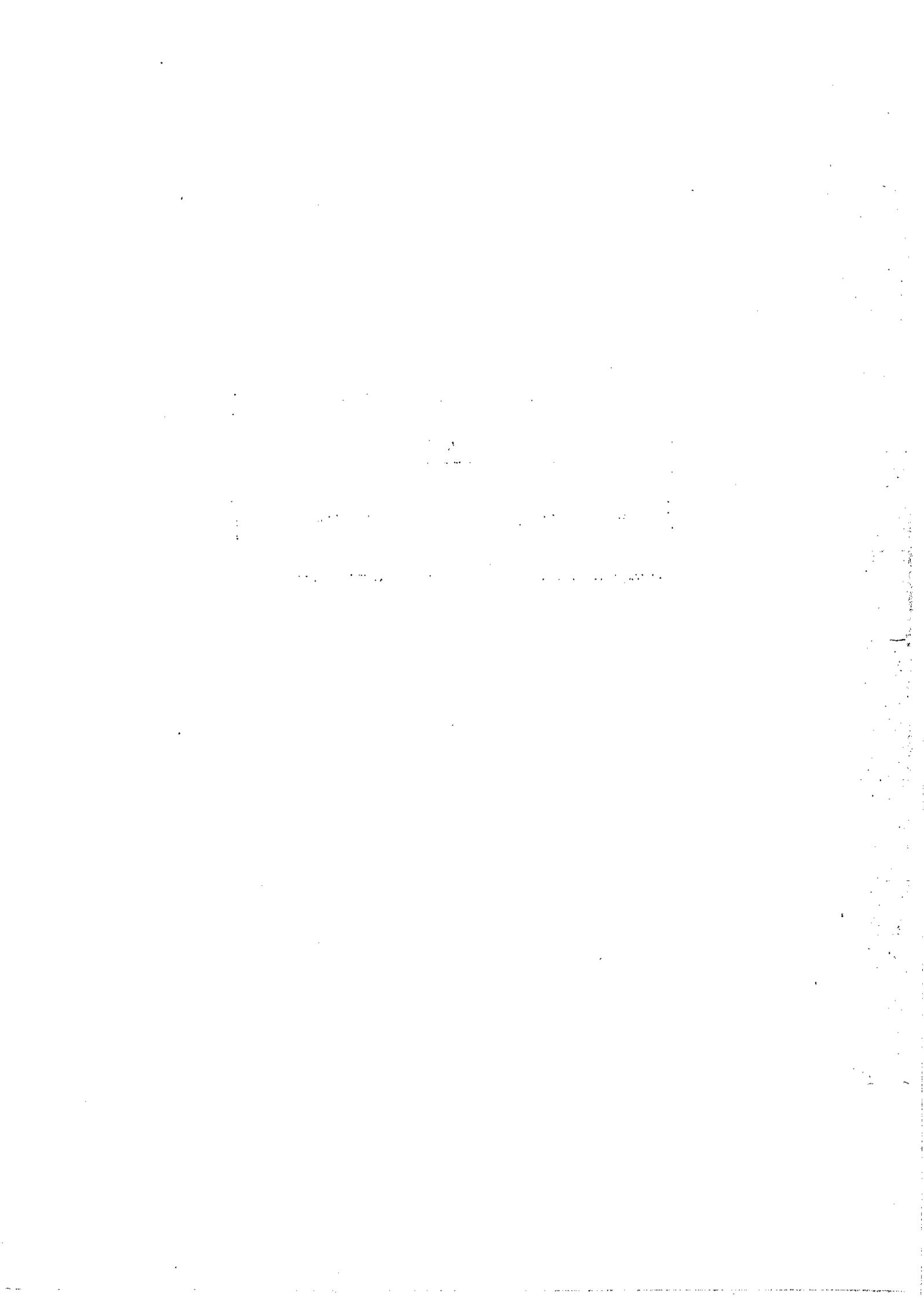
§ 1.28 - " Justesse " des partiels d'un tuyau

Nous aurons souvent recours à cette notion. On sait que les partiels successifs d'un tuyau cylindrique ouvert aux deux bouts sont en théorie comme la suite des harmoniques du premier partiel. En fait ils s'en écartent toujours... Soit $D03$ le partiel 1 d'un tuyau. Portons sur un graphique en abscisse, les harmoniques de $D03$ et en ordonnée les écarts de fréquence en savarts. En traçant le champ de liberté en fréquence de chaque partiel par référence à l'harmonique correspondant de P_1 (fig.17)

on voit instantanément que le partiel 2 est juste, le partiel 3 trop bas et les partiels 4 et 5 trop hauts.

2ème PARTIE

PARAMETRES LIES AU SYSTEME EXCITATEUR



2ème PARTIE

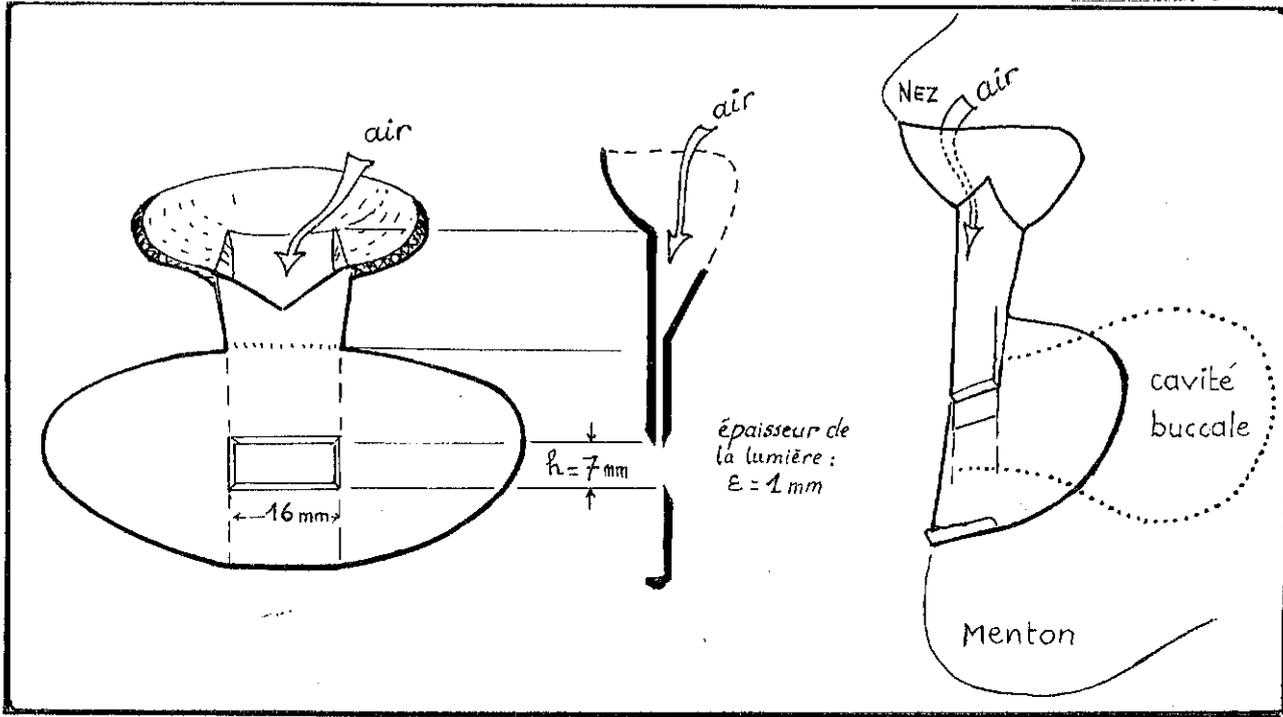
PARAMETRES LIES AU SYSTEME EXCITATEUR

CHAPITRE I - LE SYSTEME LAME D'AIR BISEAU - ETUDE DU NASOFLUTE§ 2.01 - Généralités

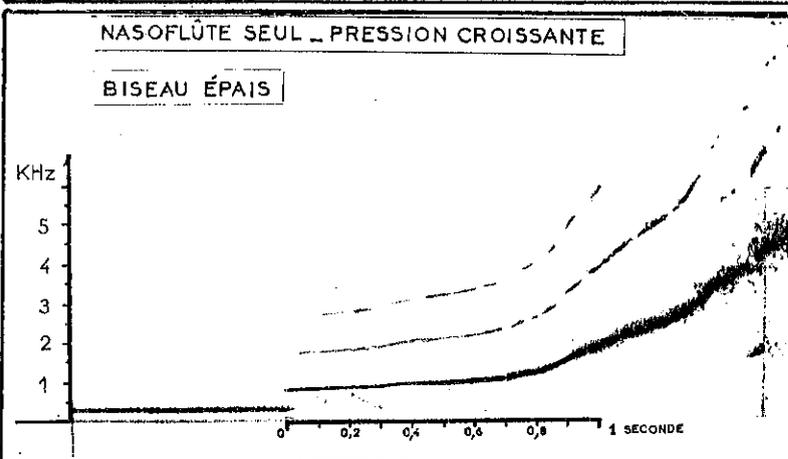
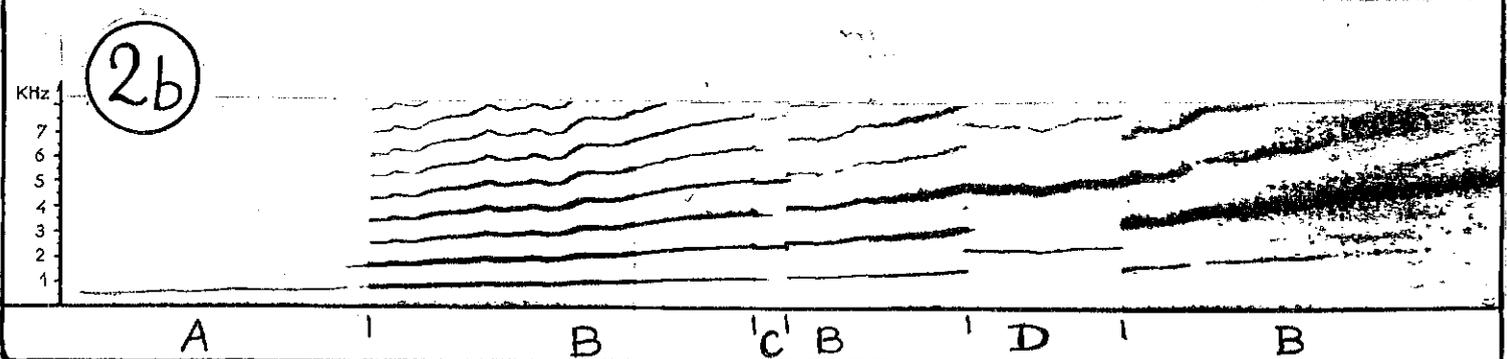
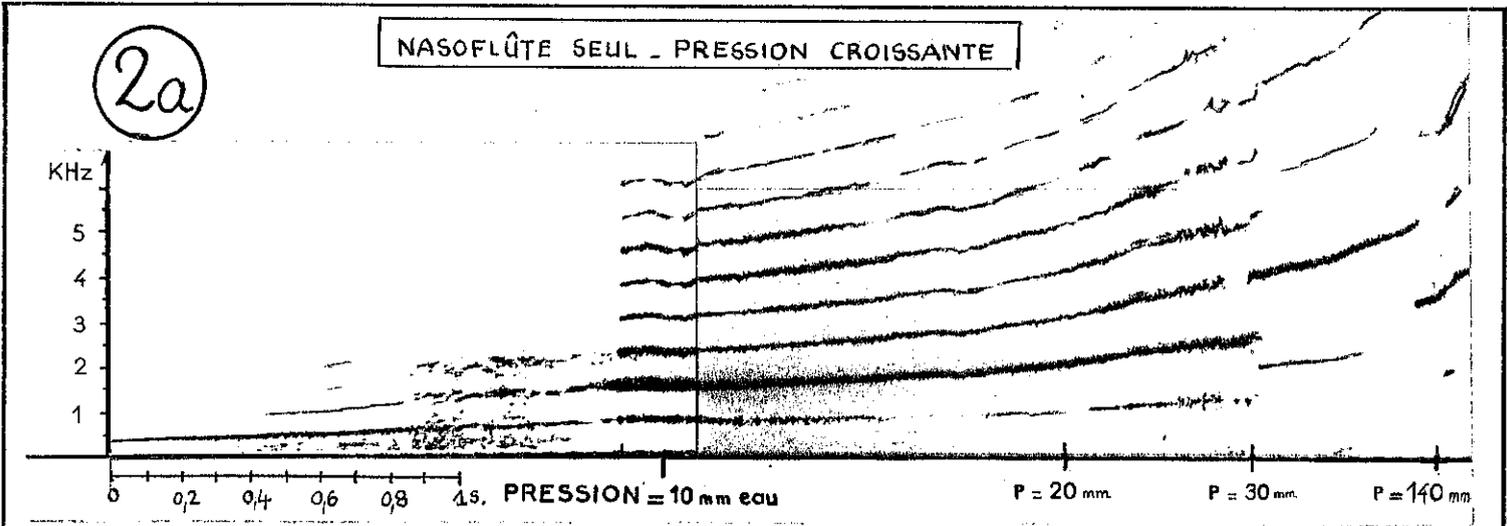
Dans cette deuxième partie nous allons examiner les variables relevant du système excitateur. Les études antérieures sont assez lacunaires en ce domaine, excepté ce qui concerne le système lame d'air-biseau isolé, encore que la spectrographie en soit fort mal connue. Nous espérons apporter quelques compléments en cette matière.

Les problèmes les plus importants et les plus intéressants concernent le rôle des paramètres de la bouche dans le fonctionnement normal du tuyau à bouche.

Sur le plan expérimental une telle étude suppose la réalisation d'une flûte à bec ou d'un tuyau d'orgue à bouche séparable dont les différentes parties seraient réglables (largeur et épaisseur de la lumière, distance lumière biseau, position de la lumière par rapport au plan du biseau). Ces impératifs conduisent à réaliser des " instruments " expérimentaux intéressants certes, mais qui n'ont plus qu'un lointain rapport avec l'instrument réel. Une des plus grandes difficultés réside dans la très grande précision requise. On peut tourner le problème en construisant un instrument de très grandes dimensions mais on risque alors d'étudier plus un instrument de laboratoire que l'instrument de musique pris comme point de départ. La seule réalisation possible concerne le système d'embouchure de la flûte traversière où les mécanismes d'excitation réglés normalement par le musicien sont réellement distincts de l'instrument proprement dit et peuvent être simulés par un appareil réglable. Nous nous appuyerons largement sur la remarquable réalisation de Y. ANDO en ce domaine (Bib. ANDO (4)). A défaut de posséder une telle installation nous nous proposons d'étudier un instrument de musique particulier " le nasoflûte " qui est en fait un système lame d'air biseau isolé. Nous essaierons, à travers l'étude spectrographique d'un grand nombre d'instruments, de dégager les rôles des différents paramètres du système excitateur dans la constitution du son du tuyau à bouche.



1



6

§ 2.02 - Le nasoflûte - Description

fig.1

Dans son ouvrage Instruments à vent T.I. § 98, BOUASSE signale que " pour une somme modique on achète toute faite une bouche amovible vendue par des camelots ". Cet instrument auquel il ne donne pas de nom est fait de telle façon (cf. fig.1) qu'en le plaçant devant la bouche ouverte et en soufflant avec le nez on excite la cavité buccale dont les dimensions déterminent la hauteur du son produit (car l'ouverture est constante). La tessiture des sons possibles est donc celle du sifflet oral, en gros de 500 à 2000 Hz. et le timbre en est très proche. Cette association d'un système lame d'air biseau et d'un résonateur constitue en fait un ocarina de volume variable. Le même instrument, fabriqué en matière plastique sous brevet américain a réapparû à Paris ces dernières années sous le nom de " Humanatone ou Noseflute ". Nous en avons acquis quelques exemplaires pour les expériences sur les sons de bouche que nous avons baptisés " nasoflûtes ".

§ 2.03 - Sons des régimes buccaux - Spectrographie

Alimentons le nasoflûte avec de l'air comprimé à pression variable et enregistrons le son ainsi produit par l'instrument isolé. Le micro est placé très près (environ à 10 cm de l'instrument) mais en prenant soin qu'il ne se produise pas de bruit parasite provenant de l'écoulement de l'air sur le micro.

fig.2a et
2b

On voit fig. 2a et b, l'analyse au sonographe des sons de bouche par pression croissante. En raison de l'important accroissement d'intensité, entre les basses et les hautes pressions, on doit corriger graduellement l'amplification du signal d'entrée de façon à obtenir un enregistrement correct des signaux les plus faibles tout en évitant la distorsion des plus intenses.

L'analyse montre clairement les différents régimes; dans l'exemple 2b il y en a 3. Pour les plus basses pressions le son est très faible et n'a que quelques harmoniques. La fréquence monte régulièrement avec la pression. Pour $p = 10$ mm d'eau, il se produit un changement brutal :

- l'intensité croît considérablement
- le son devient très riche en harmoniques de tous rangs
- l'harmonique 2 est de loin le plus intense, ce qui explique qu'à l'oreille on a la sensation d'une octaviation, alors que le fondamental continue d'exister.

Nous sommes en fait dans le régime 2; mais le régime 1, qui est à peu près à l'octave inférieure coexiste, en s'accomodant sur la fréquence du régime 2.

...../

Vers 30 mm d'eau, se produit un saut au régime III dont il est difficile de dire s'il est à la 5^{te} du régime I ou du régime II.

La figure 2b montre l'analyse du son de bouche d'un autre instrument. Les différents régimes sont repérés par des lettres. Dans cet exemple, le fondamental du régime A persiste visiblement dans le régime B. Le véritable régime II, octave du premier est le régime C qui ne fait qu'une courte apparition; sa fréquence est d'ailleurs plus basse que l'octave stricte du premier. De même, le régime D produit bien la douzième du régime A (trait le plus intense) mais aussi la quinte qui apparait avec évidence.

L'ambiguïté d'octave gêne énormément lorsqu'on tente de faire l'analyse de ces phénomènes à l'oreille, ou même à l'accordeur électronique. Les premières mesures de fréquence que nous avons faites (avant les analyses au sonographe) présentaient souvent une erreur d'octave. Seule l'analyse spectrographique nous a permis d'appréhender objectivement ces phénomènes. Il semble que le régime I, particulièrement stable, coexiste avec les régimes II et III ce qui produirait, par combinaison les régimes intermédiaires, (à la quinte par exemple).

§ 2.04 - Tracé des courbes buccales

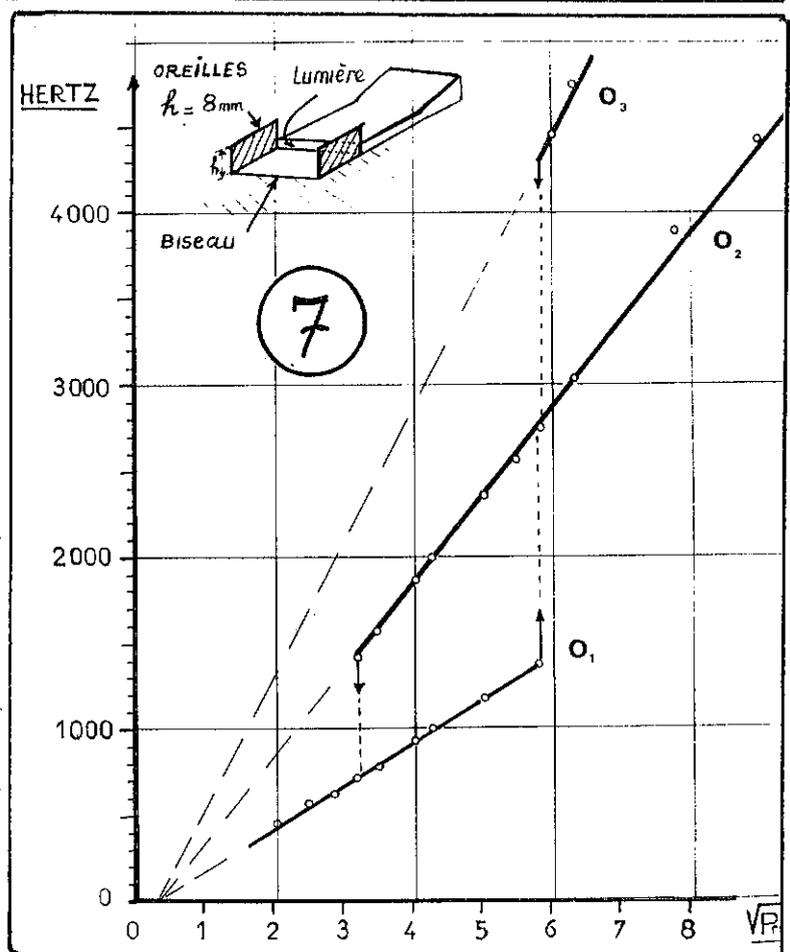
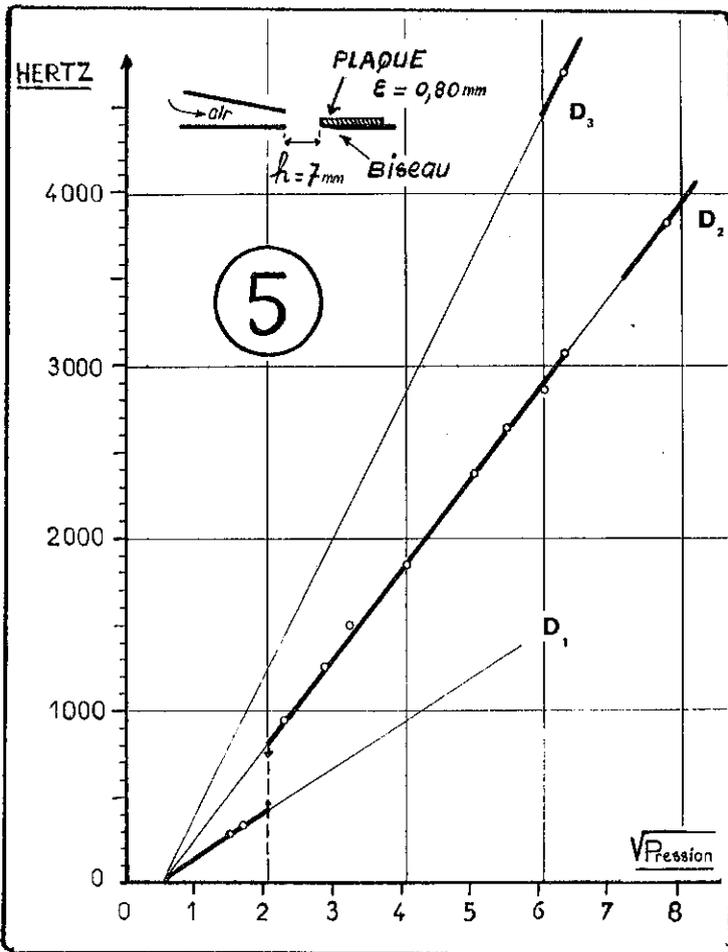
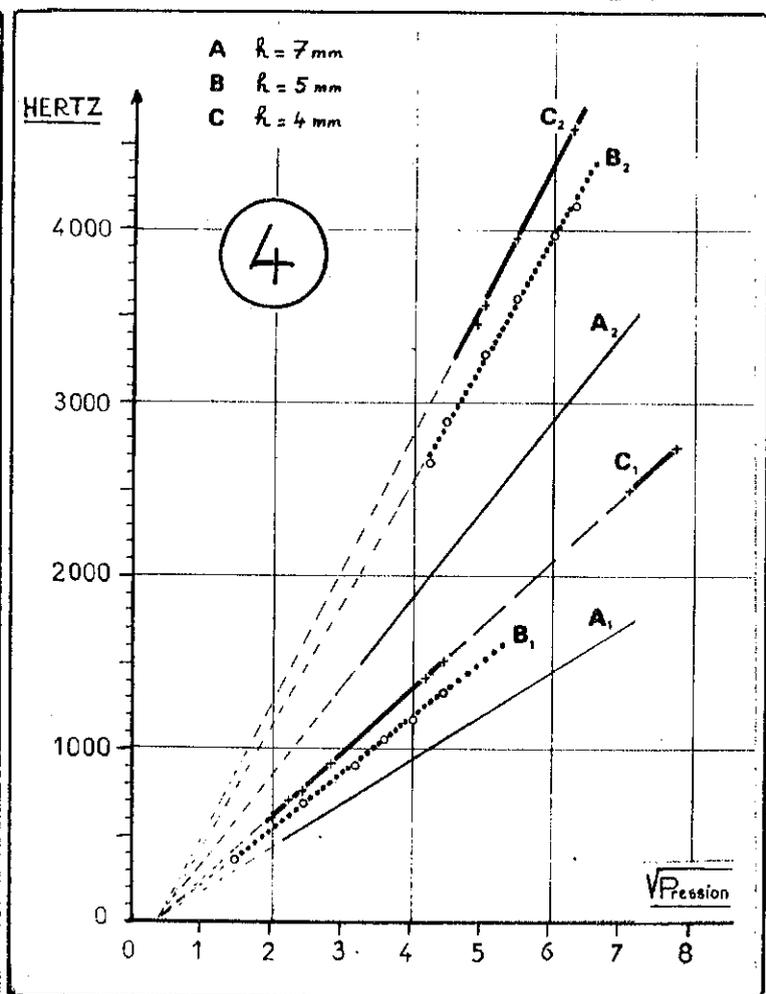
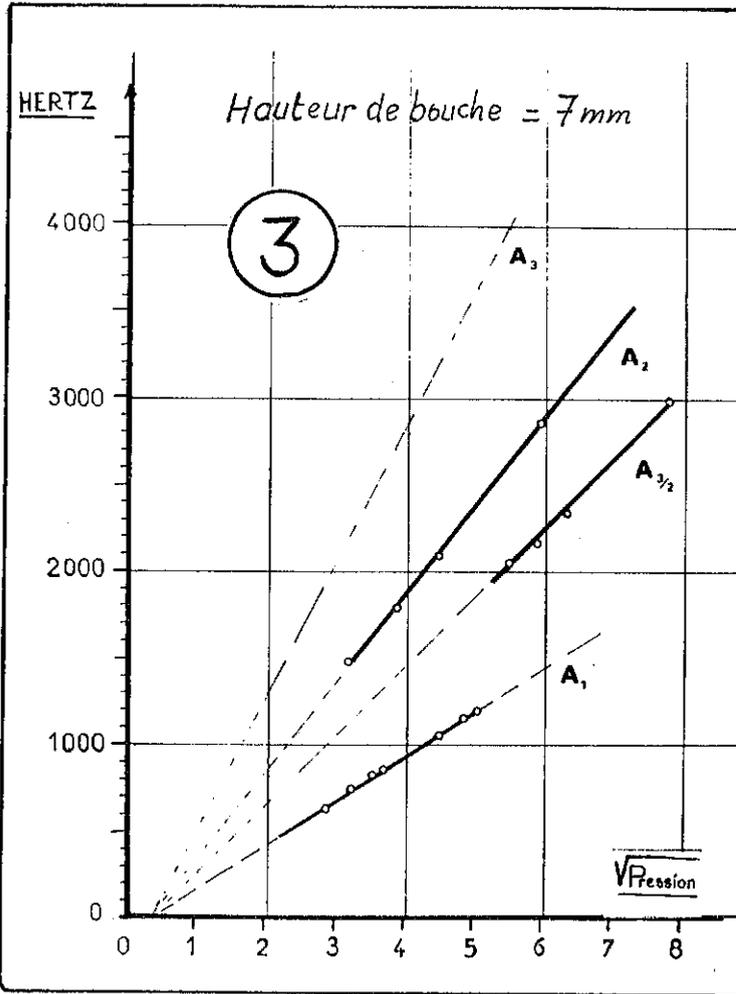
Mesurons la fréquence pour certaines valeurs de la pression. En portant les points sur un graphique nous obtenons les courbes buccales des différents régimes.

fig.3 Les points s'alignent de façon remarquable. On a : $N = k \sqrt{P}$ (fig.3) .

Les courbes prolongées vers les très faibles pressions ne passent pas par l'origine. En posant que ce sont des droites on peut écrire $N = i (k \sqrt{P} + b)$ et dans le cas particulier de notre expérience on trouve : $N = i (254,5 \sqrt{P} - 72,5)$
 $i = 1, 2, 3$ etc....

§ 2.05 - Modification de la distance lumière-biseau

A l'aide d'une plaque de métal très mince coulissant sur la face interne de l'instrument, on rapproche le biseau de la lumière, puis on relève les courbes buccales pour différentes hauteurs de bouche : successivement pour $h = 5$ mm et $h = 4$ mm. Dans un premier temps nous avons reconstitué l'épaisseur et la pente du biseau avec la pâte à modeler, mais les courbes relevées avec ou sans cette précaution n'offraient pas de différences.



Comme le laissaient prévoir les expériences faites par d'autres auteurs, la pente des courbes augmente au fur et à mesure que h diminue (fig.4). On remarque aussi que les valeurs du régime II sont, dans les deux cas, nettement plus fortes que le double de celles du régime I

Ex :

		Régime I	Régime II	
$h = 5$	$\sqrt{P} = 5$	$N = 1500$	$N = 3280$	h en mm
$h = 4$	$\sqrt{P} = 6$	$N = 2100$	$N = 4380$	P en mm d'eau
				N en Hz

Le produit Nh n'est pas constant mais varie dans le même sens que la distance lumière-biseau. On peut lire sur le tableau ci-dessous la valeur de Nh pour différentes pressions :

Pression en mm d'eau	$h = 4$	$h = 5$	$h = 7$	
6	$Nh = 3040$	3400	3780	} Régime I
8	$Nh = 3640$	4050	4550	
16	$Nh = 5360$	5925	6580	
24	$Nh = 14080$	15800	16450	} Régime II

Bref les sons des régimes buccaux sont d'autant plus aigus que la distance lumière-biseau est plus courte. On remarquera également que le régime II apparaît pour des pressions dont la valeur croît inversement à la hauteur de la bouche.

Pour une bouche donnée il existe un optimum variable selon la zone de fréquence dans laquelle elle doit fonctionner.

§ 2.06 - Épaisseur du biseau - Rôle sur la fréquence et la composition spectrale

Sur l'instrument original le biseau est extrêmement mince, de l'ordre de $3/10$ de mm à son bord. Collons une surépaisseur (plaque métallique d'épaisseur 0,8 mm de sorte que l'épaisseur totale soit de 1 mm. Evidemment on déplace du même coup la position moyenne du biseau par rapport à la lumière, qui devient ainsi plus centrale. On constate (fig.5) que les courbes buccales ne sont pas modifiées en fréquence mais que le régime I apparaît à des pressions beaucoup plus basses et dans un intervalle réduit, au bénéfice du régime II particulièrement stable. Le régime intermédiaire (A $3/2$ sur la fig.3) a disparu.

fig.6
Pl. 7

L'analyse au sonographe (fig.6) révèle que le régime II est, cette fois, bien à l'octave du I qui disparaît au moment du passage.

On remarque par ailleurs un net appauvrissement du timbre. Le saut entre les 2 régimes est aussi moins brutal.

Nous retrouverons (tuyau d'orgue) la plupart de ces observations lors d'une expérience similaire sur la lèvre supérieure d'un tuyau d'orgue.

§ 2.07 - Bouche munie " d'oreilles " latérales

Disposons de part et d'autre de la bouche deux petites plaques de métal perpendiculaires au plan de la bouche, de hauteur $h' = 18$ mm et de longueurs égale à la hauteur de la bouche ($h = 7$ mm).

L'analyse spectrale ne montre pas de changement notable, les fréquences des courbes buccales ne sont pas modifiées, mais par contre on remarque une grande stabilité de chaque régime, ce qui se traduit par de larges zones de pression communes. Voir par exemple la zone commune aux régimes I et II de 9 à 25 mm d'eau.

fig.7
Pl. 8

§ 2.08 - Conclusions

Le nasoflûte nous a permis d'étudier quelques paramètres liés aux dispositions géométriques de la bouches.

Indépendamment des modifications de fréquence du son de bouche étudiées antérieurement par divers auteurs nous avons montré l'intérêt de la spectrographie en ce domaine, et attiré l'attention sur l'observation du déplacement des zones de pression.

Nous n'avons pas présenté d'expériences portant sur les rôles de la largeur de la lumière ainsi que sur la position relative des plans lumière et biseau ; nous y viendrons plus loin, à propos de l'étude du tuyau d'orgue.

CHAPITRE II - LE TUYAU A BOUCHE

PHENOMENES GENERAUX LIES A L'ALIMENTATION DU TUYAU

§ 2.09 - Système lame-d'air biseau associé à un résonateur, le tuyau à bouche (Rappe

L'essentiel des descriptions qui suivent est emprunté à BOUASSE qui traite cette question en divers endroits de ses ouvrages (BOUASSE (2), § 52 à 60, (3) TI § 96 à 103, TII § 152 à 164, (5) p.10, 40 à 45).

a) Couplage lâche.

Approchons du système lame d'air biseau un résonateur dont les fréquences propres sont N_1 , N_2 , N_3 et faisons croître la pression d'alimentation de l'air. On entend des sons de hauteur bien définie, correspondant à peu de choses près aux partiels du résonateur. Les fréquences possibles se situent aux intersections des courbes buccales des régimes I, II, III ... avec les horizontales N_1 , N_2 , N_3 etc du résonateur.

On note que :

- l'intensité des sons ainsi produits est supérieure à celle que l'on obtient avec le système lame d'air biseau seul,
- Entre deux paliers le système peut cesser de fonctionner. Il y a des silences.

b) Couplage serré : régime buccal, régime normal.

Le système lame d'air biseau est cette fois entièrement dans le domaine du résonateur, fixé à l'entrée de celui-ci. Si le résonateur est un tuyau, nous nous trouvons dans le cas du tuyau à bouche.

Faisons croître la pression en partant de zéro. Pour les faibles valeurs de la pression on observe les mêmes phénomènes que précédemment : stabilisation des sons de bouche sur certains partiels du tuyau, sauts successifs de l'un à l'autre : nous sommes dans le régime buccal. Le tuyau se comporte comme un résonateur excité par une source extérieure : il amplifie les sons des régimes buccaux lorsque ceux-ci se trouvent coïncider avec ses propres partiels. L'existence de paliers de fréquence prouve que le tuyau réagit un peu sur la source en stabili-

sant l'écoulement.

En général les régimes buccaux n'existent que pour les faibles pressions (quelques millimètres d'eau). Il en résulte que les sons ainsi obtenus sont de faible intensité et surtout très instables : le champ de liberté en pression des partiels est extrêmement réduit et l'ordre d'apparition de ces partiels est difficilement prévisible. Pour toutes ces raisons les sons émis en régime buccal ne sont pas utilisés en musique.

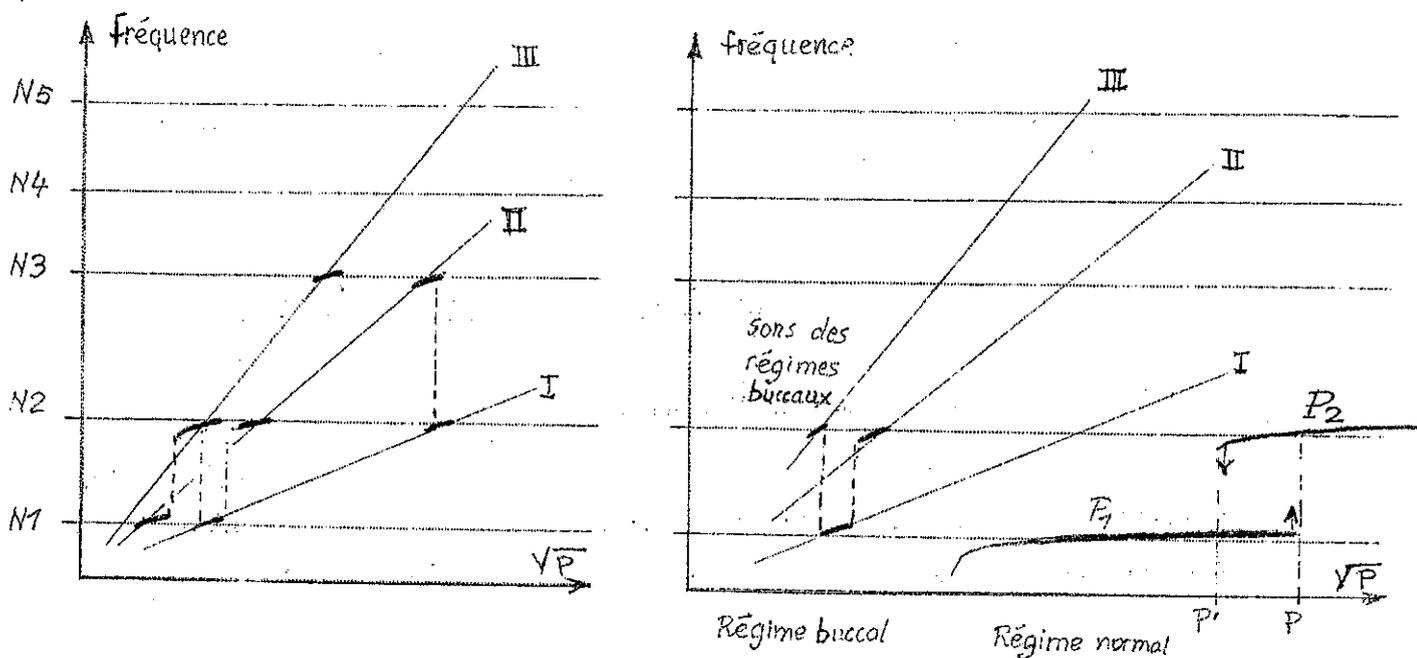
Les facteurs d'orgue connaissent bien le régime buccal qu'ils dénomment " pialement ". La démonstration la plus évidente de ce phénomène se produit lorsqu'on arrête la soufflerie d'un instrument en maintenant quelques touches enfoncées. Quand les réservoirs sont presque vides et que la pression baisse dans les sommiers on entend une succession rapide de sons purs graves et aigus avant que l'orgue ne se taise définitivement.

Selon les dimensions de la bouche les régimes buccaux peuvent subsister pour des pressions relativement grandes ou au contraire être totalement inexistants.

La stabilité des régimes buccaux est liée à la hauteur de la bouche.

Continuons à faire croître la pression d'alimentation.

On reconnaît l'entrée dans le régime normal au fait que l'intensité du son devient soudainement plus grande et surtout à ce que le partiel 1, que l'on obtient d'abord, reste stable sur un grand intervalle de pression. Pendant que la pression croît, la fréquence de ce partiel croît aussi, dans un intervalle qui dépasse couramment le 1/2 ton tempéré.



Si la pression croît encore, le tuyau à bouche change de régime et passe au partiel 2 pour une pression P . De là faisons décroître la pression : le partiel 1 réapparaît pour la pression P' .

Nous devons faire les remarques suivantes :

- les pressions P et P' de passage changent d'une fois sur l'autre et en particulier selon la vitesse de variation de la pression.

- on a généralement $P' < P$ mais ce n'est pas la règle.

- Dans la zone PP' l'un ou l'autre partiel peut être émis selon la façon dont on entre dans cette zone. Par pression croissante on aura $P1$. Par surpression brusque suivie d'une diminution de pression (coup de langue), on amorce d'emblée le partiel 2.

- Les deux partiels peuvent très bien coexister.

- Lorsqu'on émet successivement tous les partiels d'un tuyau à bouche par pression régulièrement croissante, il arrive que certains d'entre deux ne sortent jamais sauf si on les amorce au coup de langue.

- Les sons des régimes buccaux sont de loin beaucoup plus aigus que les sons émis par le tuyau en régime normal.

D'ailleurs régime buccal et régime normal peuvent coexister.

- La stabilité en pression des partiels dépend de la hauteur de bouche. Quand la bouche est basse (distance lumière biseau petite), la stabilité des premiers partiels devient faible au profit des partiels aigus qui sortent en plus grand nombre.

Nous aurons l'occasion de revenir sur ces phénomènes à propos des expériences dont nous allons maintenant rendre compte.

1) Production du son d'un tuyau à bouche

§ 2.10 - Lancement du tuyau : L'attaque

La mise en route d'un tuyau à bouche dépend directement de la loi de variation de la vitesse de l'air qui l'alimente. On rencontre dans le jeu traditionnel des flûtes, surtout celles où le musicien contrôle entièrement la production du

Le mode de lancement du tuyau conditionne en grande partie la composition spectrale du transitoire d'attaque. Nous en verrons plusieurs exemples. Mais tout d'abord, essayons d'analyser le rôle du son de biseau dans le transitoire d'attaque en prenant l'exemple d'un tuyau d'orgue pour lequel l'attaque, liée à l'ouverture de la soupape, est de ce fait assez bien reproductible.

§ 2.11 -- Analyse de l'attaque d'un tuyau d'orgue ouvert aux deux bouts --

Rôle du son de bouche

Plaçons un tuyau d'orgue de taille moyenne sur le sommier expérimental pour enregistrer le son de bouche. Pour cela " annulons " le tuyau en l'emplissant de chiffons, mais en prenant bien soin de ne pas gêner l'écoulement de l'air au niveau de la bouche. Puis enfonçons la soupape comme pour le jeu ordinaire du tuyau. L'analyse du son de bouche isolé (fig.8) montre un grand nombre de composantes inharmoniques assez bien définies dans les basses fréquences. On note une très brève montée en fréquence au début de l'établissement du son, liée à la rapide augmentation de pression au moment de l'ouverture de la soupape.

A présent, retirons le chiffon; cette fois le tuyau parle normalement.

La partie transitoire du son du tuyau, l'attaque proprement dite, dure, dans notre exemple, environ 30 ms. On note :

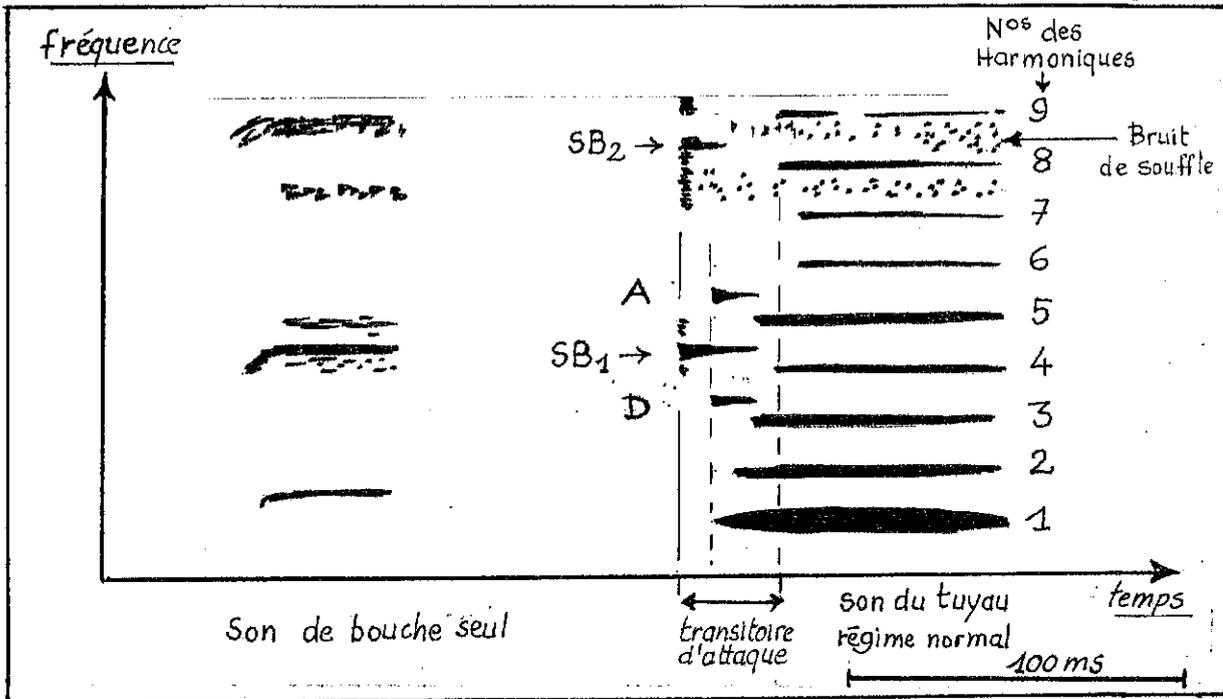
- des fréquences évolutives de courte durée, étrangères aux harmoniques du tuyau, accompagnées de bruits plus ou moins intenses.

- la croissance en intensité des harmoniques du tuyau, apparaissant dans un ordre particulier : 1, 2, 3, 5, 4, 8, 9 puis 6 et 7 dans notre exemple. Lorsque tous les harmoniques sont établis, on atteint la partie quasi-stationnaire du son.

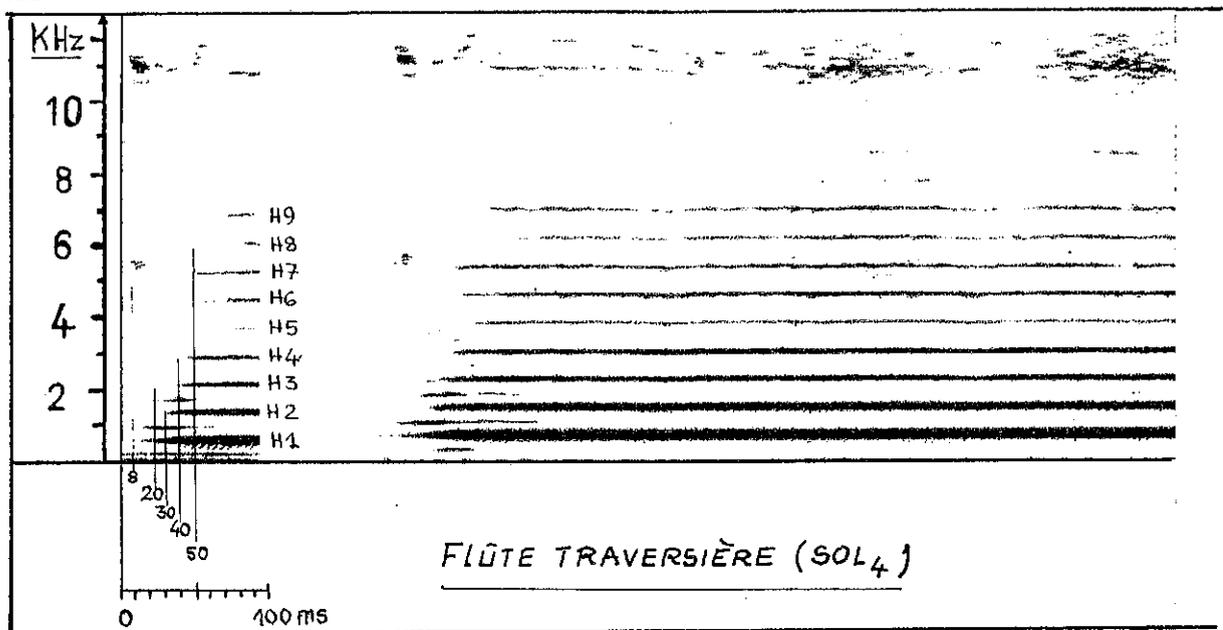
Essayons de relier les fréquences précédant l'arrivée des harmoniques aux composantes du son de bouche.

Dès l'ouverture de la soupape le son de biseau se constitue mais seules 1 ou 2 de ses composantes, en accord avec les partiels du tuyau pourront effectivement se stabiliser. Le fonctionnement est donc celui du régime buccal, le tuyau n'étant, pendant ce court instant qu'un résonateur passif. On voit sur la figure 8 que la 2ème composante du son de bouche SB 1 accorde le partiel 4 du tuyau (plus aigu que l'harmonique 4 du partiel 1). Elle est accompagnée d'un harmonique (SB 2). Les deux autres fréquences, A et D du transitoire apparaissent en même temps que le fondamental H1 du tuyau et subsistent tant que la composante SB se maintient. Il s'agit

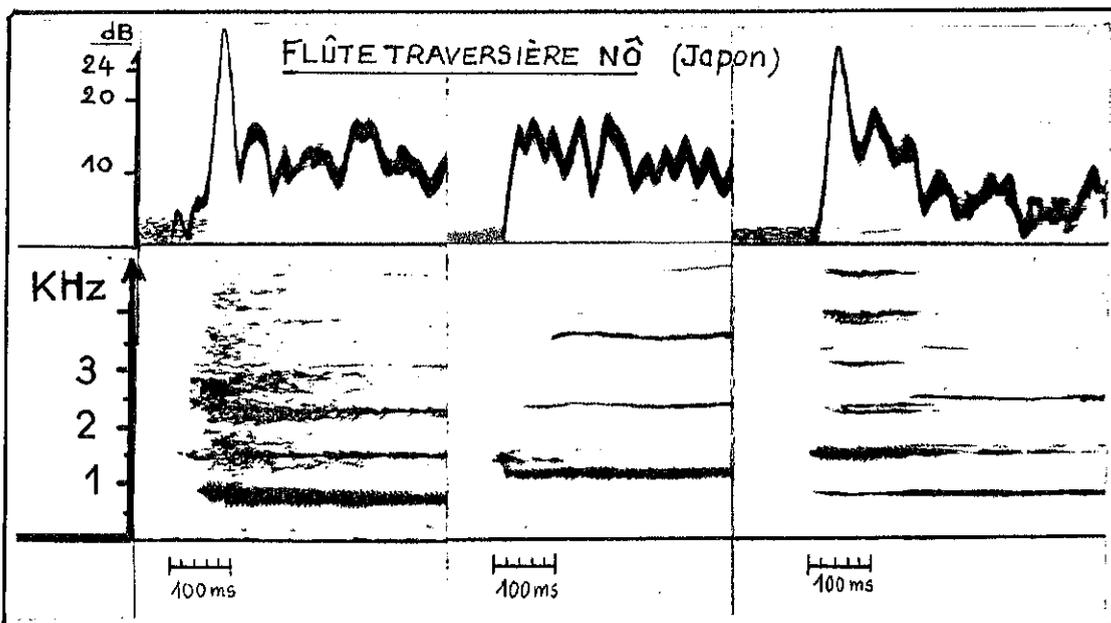
...../



8



9



12

de sons de combinaison entre le son de bouche et le son du tuyau, respectivement un additionnel ($SB1+ H1$) et un différentiel ($SB1- H1$).

On vérifie donc que le son de bouche joue un rôle important dans l'attaque du tuyau. C'est l'impulsion qui lance le tuyau. De plus la coloration, la netteté, la quantité de bruit de l'attaque vont dépendre étroitement de la composition spectrale du son de bouche.

On peut prévoir également que si le son de bouche est trop riche en composantes spectrales, trop stable, il retardera d'autant l'établissement du régime normal du tuyau et pourra même subsister avec celui-ci sous forme de bruit d'écoulement.

L'exemple que nous venons d'analyser est typique, mais dans la réalité on trouve bien des variantes. Le rôle de l'harmoniste d'orgue, du facteur de flûte à bec ou du joueur de flûte traversière sera justement de régler les différents paramètres de la bouche afin d'adapter au mieux le son de bouche en fonction de la qualité sonore qu'il recherche.

Le rapport de justesse des partiels, le régime de fonctionnement du tuyau jouent aussi un rôle important dans la nature de l'attaque. Examinons quelques cas typiques rencontrés dans les tuyaux à bouche.

§ 2.12 - Attaque en régime 2 de la flûte traversière moderne

L'attaque en régime fondamental d'un tuyau ouvert aux deux bouts possédant des partiels quasi-harmoniques est le cas le plus usuel. Mais dans de nombreux instruments, les flûtes en particulier, l'attaque a pour but d'accrocher directement un partial élevé. Les régimes inférieurs peuvent éventuellement apparaître au cours de l'établissement du son.

fig.9

La figure 9 montre un exemple caractéristique de l'attaque de la flûte traversière moderne dont les partiels sont bien accordés. Il s'agit de l'attaque d'un son de la deuxième octave avec l'articulation " Te ". Dans cet instrument, on constate souvent, au moment du transitoire la trace du régime 1 sous forme de raies intermédiaires, entre les harmoniques du son joué. L'accrochage de ce régime peut être si fugitive qu'on ne le perçoit pas à l'oreille en tant que tel, mais il entre pour une part importante dans le timbre du son : on reconnaît ainsi qu'on est en régime 2. Le son de bouche, généralement très aigu dans la flûte traversière est visible sur notre analyse sous forme de deux bandes de bruit vers 5000 et 11000 Hz, celle-ci étant la plus intense. La durée totale du transitoire d'attaque, entre le premier bruit de bouche et l'apparition des harmoniques 7, 8 et 9 est ici de 50 ms. Le son commence



sur l'harmonique 3 du régime 1, puis entre le fondamental du régime 2, l'harmonique 3 du régime 2 et le fondamental du régime 1, puis successivement les harmoniques 2, 4 etc. du régime 2.

On peut lire sur la figure les durées écoulées entre le début de l'attaque et l'entrée de chaque composante.

§ 2.13 - Attaque d'un son de fourche à la flûte à bec

Les doigtés de fourche (cf. § 3.28) donnent des partiels inharmo- niques susceptibles de se produire pour des pressions voisines. L'attaque comporte donc un grand nombre de fréquences inharmo- niques accrochées par le son de bouche qui peuvent interférer entre elles, ou avec les harmoniques du son joué.

Dans notre exemple, note sib₃ jouée à la flûte à bec alto, 4 partiels inharmo- niques sont susceptibles de sortir au moment de l'attaque (voir § 2.28).

fig.10
Pl.10

On voit effectivement sur l'analyse (fig.10) les sons II, III, IV et V. Le partiel IV, particulièrement intense, produit avec le fondamental un additionnel (IV + N) qui se confond avec le partiel V et un différentiel (IV-N); il se combine également avec le partiel II en donnant un différentiel et un additionnel. D'autres sons de combinaison sont analysés sur la figure. Il est à noter que les partiels con- sidérés persistent dans le son du tuyau sous forme de " chuchotements " visibles sur la figure à l'état de traces. On entend très bien ces partiels chuchotés qui sont ca- ractéristiques du timbre des sons de fourche.

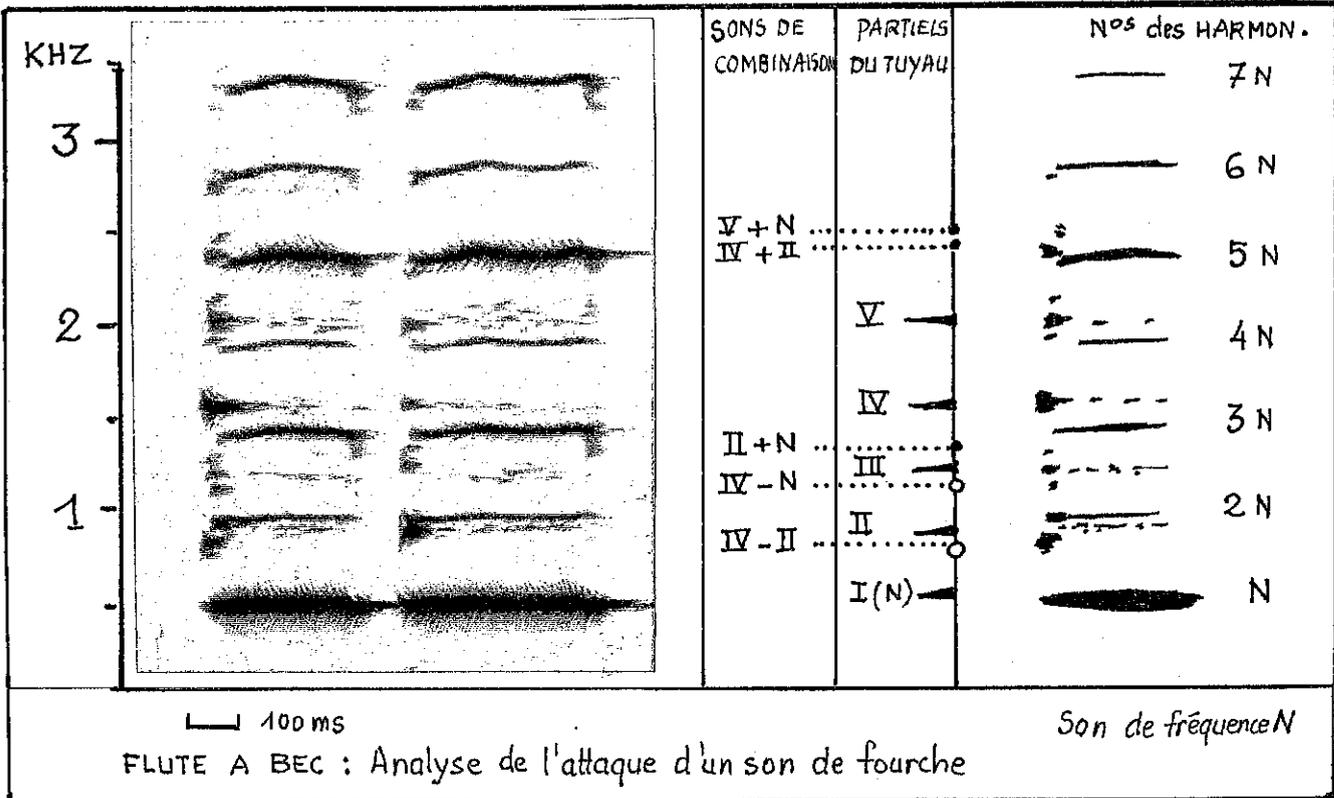
Le mode d'attaque permet de doser le nombre de partiels apparaissant à l'atta- que. On pourra comparer de ce point de vue la note DO₅ de la deuxième octave jouée suc- cessivement avec les attaques Ho et Te. La première permet pratiquement d'éliminer tout bruit de bouche mais on constate un important bruit de souffle (fig.11).

fig.11

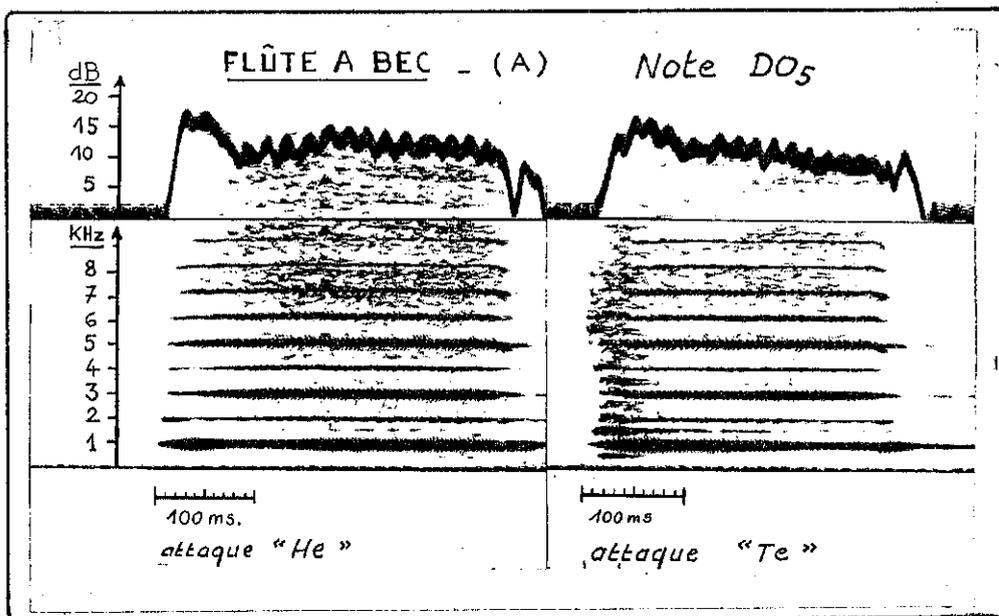
§ 2.14 - Exemples d'attaques à la flûte traversière Nô

Cette flûte traversière Japonaise dont la tessiture est celle du piccolo (cf. fiche n° 10) a pour particularité de posséder des partiels très éloignés de la série harmonique. Elle est très souvent utilisée dans le registre aigu (régimes 2 et 3). Dans le style de jeu traditionnel, le musicien n'utilise pas de coup de langue. Pour émettre un son, il provoque une augmentation rapide et brutale de la pression, ce qui permet d'accrocher successivement ou simultanément 1 ou 2 régimes non harmo- niques, généralement plus aigus que le son principal. Cette technique particulière, toute en contrastes, est d'une grande originalité.

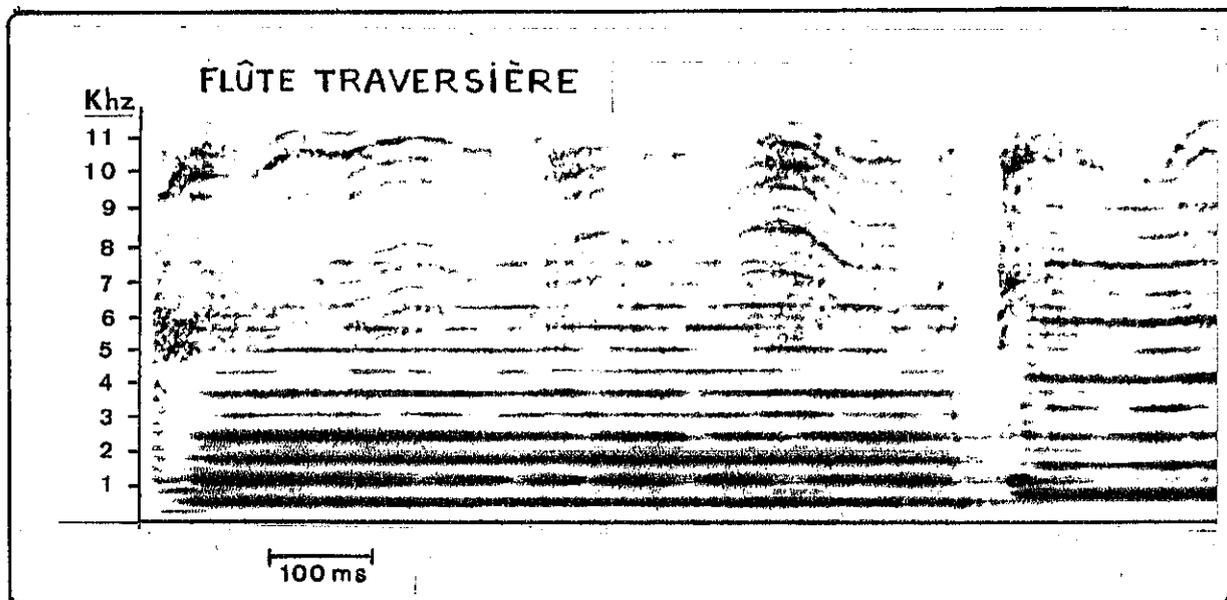
...../



10



11



13

fig.12
Pl. 9

On peut voir deux exemples de ce type d'attaque sur la fig.12. Précisons bien qu'il ne s'agit pas ici de régimes buccaux mais bien de l'existence éphémère de différents régimes.

§ 2.15 - Permanence du son de bouche dans le son du tuyau

Dans plusieurs des exemples que nous venons de voir, le son de bouche subsiste de façon autonome dans le son de tuyau, sous forme de bandes de bruits mêlés aux harmoniques, dans des zones de fréquence qui sont bien en rapport avec les composantes originales du son de bouche isolé. Mais il se peut également que persistent dans le son du tuyau de véritables sifflements, grésillements, parfois très intenses. Ce phénomène est fréquent à la flûte traversière.

fig.13
Pl. 10

Sur la figure 13 on remarque dans l'aigu, entre 5000 et 8000 Hz, des fréquences affectées d'une rapide évolution en fréquence et qui, fait surprenant, conservent entre elles une différence de fréquence constante puisqu'elles sont équidistantes sur le sonagramme. A l'analyse, leur équidistance se révèle être égale à la fréquence du fondamental. Il s'agit donc de sons de combinaison (additionnels, différentiels) entre une fréquence du son de bouche particulièrement intense, et les harmoniques du son joué. La variation de fréquence est synchronisée sur le vibrato du flûtiste; le grand intervalle de cette variation atteste bien qu'il s'agit d'un son de bouche dont la fréquence, nous l'avons vu, varie rapidement avec la pression. Flûtistes, harmonistes cherchent généralement à éliminer ces phénomènes bien qu'ils soient souvent peu audibles à quelque distance, sauf dans le cas où le son de bouche interfère avec le son émis par le tuyau en produisant des grésillements de natures diverses.

On ne peut qu'insister une fois de plus sur la complexité du fonctionnement de la bouche au cours de l'entretien de tels phénomènes.

2) Modification de la pression d'alimentation (bouche fixe)

Dans ce qui suit, la bouche de l'instrument est supposée fixe dans ses dimensions et sa construction. Le seul fait de modifier la pression d'alimentation de l'air s'accompagne d'une série de changements de hauteur, de timbre, d'intensité à l'intérieur d'un même régime, ainsi que des phénomènes liés aux passages d'un régime à l'autre.

Les instruments du type flûte à bec n'offrent au musicien qu'une seule possibilité d'action : la variation de pression, et pourtant permettent de créer une musique élaborée, ce qui montre bien l'importance des facteurs mis en jeu par la seule

variation de pression. Pour des raisons pratiques, nous avons mesuré la pression et non la vitesse. On sait que pour les phénomènes aériens, pression et vitesse sont liées par la relation :

$$v = 3960 \sqrt{p} \quad (p \text{ en mm d'eau}).$$

v en mm/s

§ 2.16 - Variation du débit

Le débit volume $Q = s \times v$ croît directement avec l'augmentation de vitesse ou de pression. Dans une flûte à bec, la section du canal étant fixée une fois pour toutes, le débit à l'entrée du bec est proportionnel à \sqrt{p} . Comme les sons des régimes supérieurs nécessitent une plus grande pression, le débit d'air alimentant l'instrument croît avec la fréquence; les valeurs extrêmes dépendent du champ de liberté en pression. Pour le confort du musicien, elles ne doivent pas dépasser certaines limites au delà desquelles celui-ci, ou s'"asphyxie" (débit trop faible) ou se contraint d'inspirer très fréquemment (débit trop grand).

Nous reviendrons plus en détail sur cette question au § 2.40

§ 2.17 - Variation de la fréquence avec la pression

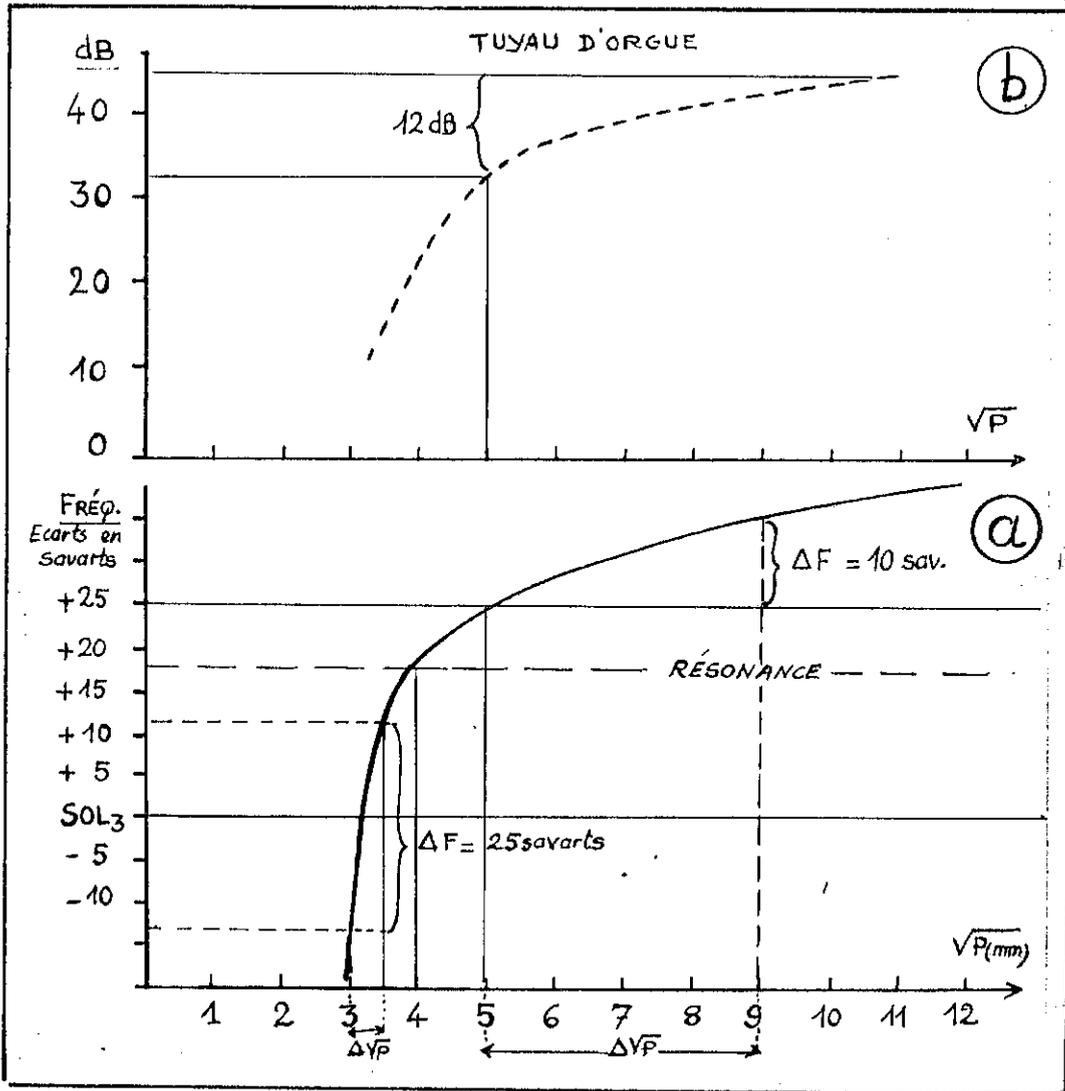
Prenons un tuyau d'orgue que nous alimentons avec de l'air à pression croissante et mesurons la fréquence dès que le son du tuyau s'établit. En portant le logarithme de la fréquence en ordonnée (notes de musique) et \sqrt{p} en abscisse, on obtient le graphique de la fig. 14a montrant bien que la fréquence croît avec l'augmentation de pression. Cependant on remarque immédiatement que la courbe ainsi tracée présente 2 parties différentes dont le point de raccordement se situe vers $\sqrt{p} = 4$ mm d'eau. Dans la première partie la fréquence augmente très rapidement avec la pression; on lit sur le graphique une croissance d'environ 25 savarts pour $\Delta\sqrt{p} = 0,5$ ($25/0,5 = 50$

Dans la seconde partie $\sqrt{p} > 4$, la pente est beaucoup plus faible et décroît légèrement à mesure que \sqrt{p} croît.

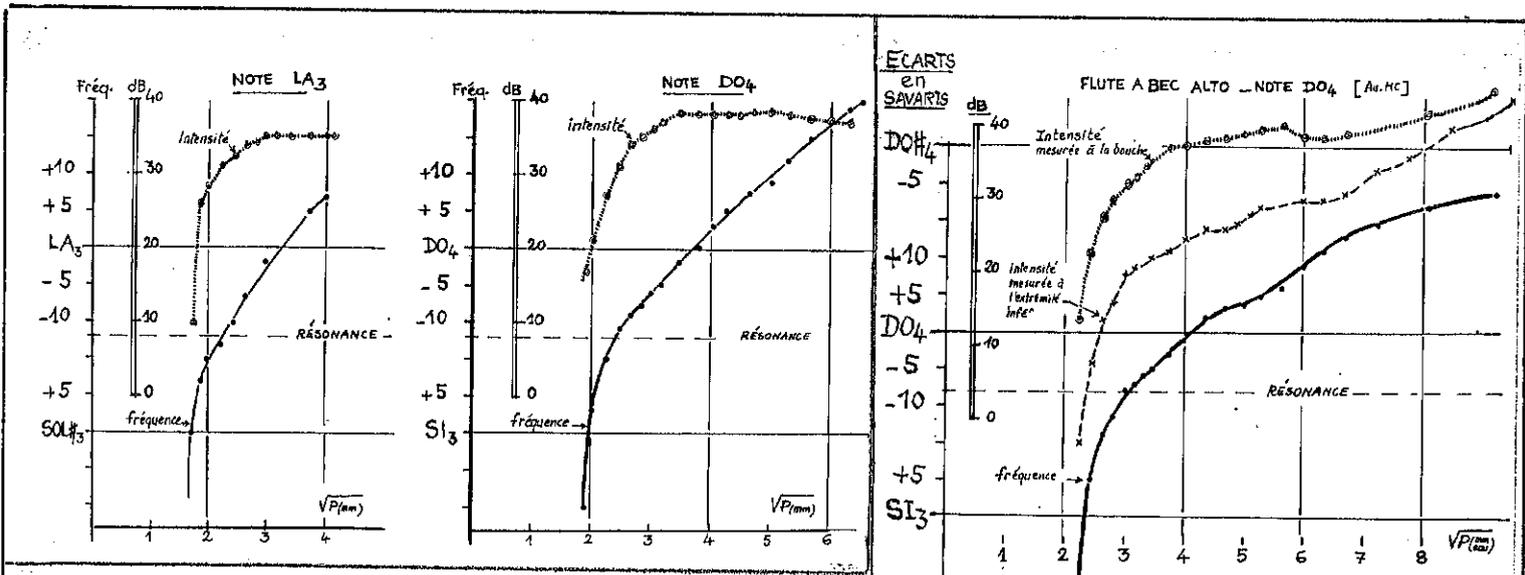
Dans la zone où \sqrt{p} est compris entre 5 et 9 ($\Delta\sqrt{p} = 4$) la pente moyenne est de l'ordre de 10 savarts, ($10/4 = 2,5$) soit 20 fois plus faible.

Les deux courbes se raccordent de façon continue. Dans la partie initiale le tuyau fonctionne en régime buccal, ce que l'on reconnaît à la variation rapide de la fréquence avec la pression, et à l'intensité très faible du son; il faut mettre le micro à quelques centimètres de la bouche pour enregistrer un son.

...../



14



—•— courbes fréquence - pression
 ○○○○○ Intensité mesurée à la bouche
 x—x " mesurée à l'extrémité inférieure

15a

15b

15c

On assiste donc à un passage progressif du régime buccal au régime normal car il n'y a pas de rupture, pas de saut en fréquence.

La zone d'existence du partiel 1, clairement délimitée vers les hautes pressions, par le saut au partiel supérieur, ne l'est pas franchement du côté des basses pressions. Seules la chute rapide d'intensité jointe à une instabilité grandissante du son en limitent l'utilisation musicale dans cette zone. MERSENNE (Livre V des Instruments, p. 235) qui fait état de tous les sons que l'on peut émettre avec un flageolet conclut que " ces sons ne peuvent servir à la Musique, à raison de leur faiblesse et de leur inconstance, car ils ressemblent aux bruits que l'on oyt au dedans de l'oreille ".

On voit que le " pseudo-palier " en fréquence du partiel, pour reprendre l'expression de BOUASSE, s'étend tout de même sur 15 savarts définissant ainsi le " champ de liberté en fréquence " de ce partiel.

On remarquera également que la fréquence de résonance du tuyau (Sol# 3 - 7 sav.) se situe à peu près à la transition régime buccal - régime normal pour ce tuyau. Lors de son utilisation musicale, le tuyau fonctionne donc à des fréquences plus élevées que la résonance.

§ 2.18 - Variation d'intensité - Tuyau d'orgue

fig.14b Au cours de l'expérience précédente nous avons mesuré l'intensité du son à l'aide d'un décibel-mètre étalonné en plaçant le micro à 5 cm face à la bouche. La courbe ainsi obtenue (fig.14b) montre l'évolution de l'intensité du son au cours de l'augmentation de pression. Elle évolue de façon semblable à celle de la courbe de fréquence. On note également un changement de pente pour $\sqrt{p} \approx 5$. Entre cette valeur et le maximum utilisable on dispose d'environ 12 dB de dynamique. Cependant il ne faut pas oublier que l'intensité physique mesurée en dBC n'a que de lointains rapports avec la sensation d'intensité qui, elle, dépend étroitement de la répartition spectrale de l'énergie.

§ 2.19 - Variation d'intensité - flûte à bec

En pratiquant des mesures d'intensité avec différentes flûtes à bec nous avons obtenu les résultats suivants.

A l'embouchure, l'intensité suit une courbe dont la croissance est tout d'abord analogue à celle de la fréquence, puis brusquement sa pente diminue, devient

fig.15a nulle et l'on peut même constater une chute de l'intensité alors que la pression d'
15b alimentation continue à croître. L'intensité perçue croît également (fig.15 a et b).

fig.15c Nous avons alors mesuré dans les mêmes conditions l'intensité du son recueil-
li à l'extrémité opposée à la bouche. On constate, fig. 15c, que la courbe est diffé-
rente de la précédente et continue à croître dans la partie où la courbe de l'embou-
chure est stationnaire. Il se produirait donc un échange d'énergie entre les 2 sources
principales que constituent la bouche et l'extrémité inférieure. Cette question serait
à approfondir pour voir également le rôle joué par les trous latéraux.

REMARQUE - Les relevés d'intensité n'ayant pas été faits dans les conditions permet-
tant une mesure absolue (pièce sans réflexion) nous ne retenons de ces relevés que
l'allure générale des courbes et l'ordre de grandeur de la dynamique totale. Il est
d'ailleurs possible que les propriétés directionnelles de l'embouchure se modifient
entre le début de l'émission du son et l'instabilité précédant le passage au partiel
suivant. FRANZ et ISING (cf. Bib.) ont montré que le diagramme de rayonnement d'un
tuyau d'orgue dépendait du partiel émis.

Cependant la courbe relevée au niveau de la bouche est sans doute liée assez
étroitement au fonctionnement de celle-ci, et nous verrons qu'on peut assez bien la
relier avec les qualités musicales du son.

§ 2.20 - Modification du contenu harmonique avec la pression d'alimentation

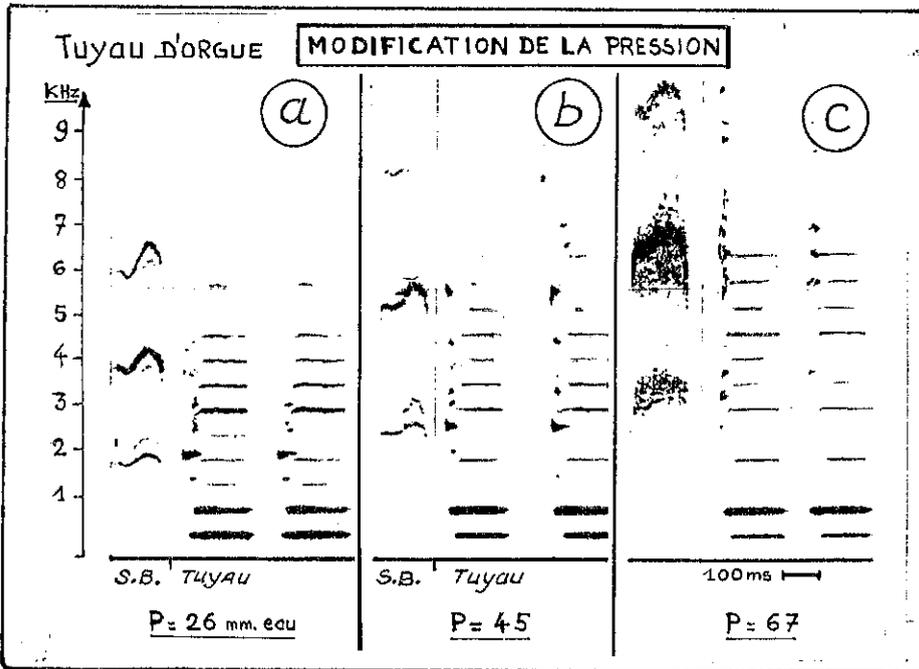
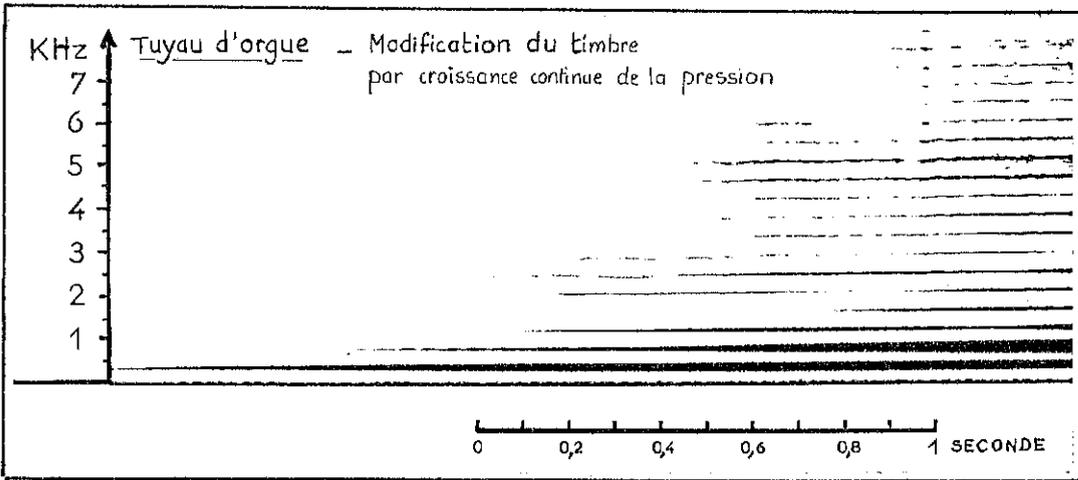
En régime buccal le son est si faible qu'il n'est pas possible de l'analyser
dans les mêmes conditions que le son normal. Nous le négligerons donc, d'autant qu'il
n'est pas utilisé en musique.

fig.16 Depuis l'entrée dans le régime normal jusqu'au saut au partiel supérieur, le
son du tuyau montre des modifications spectrales assez importantes. On constate notam-
ment (fig.16) :

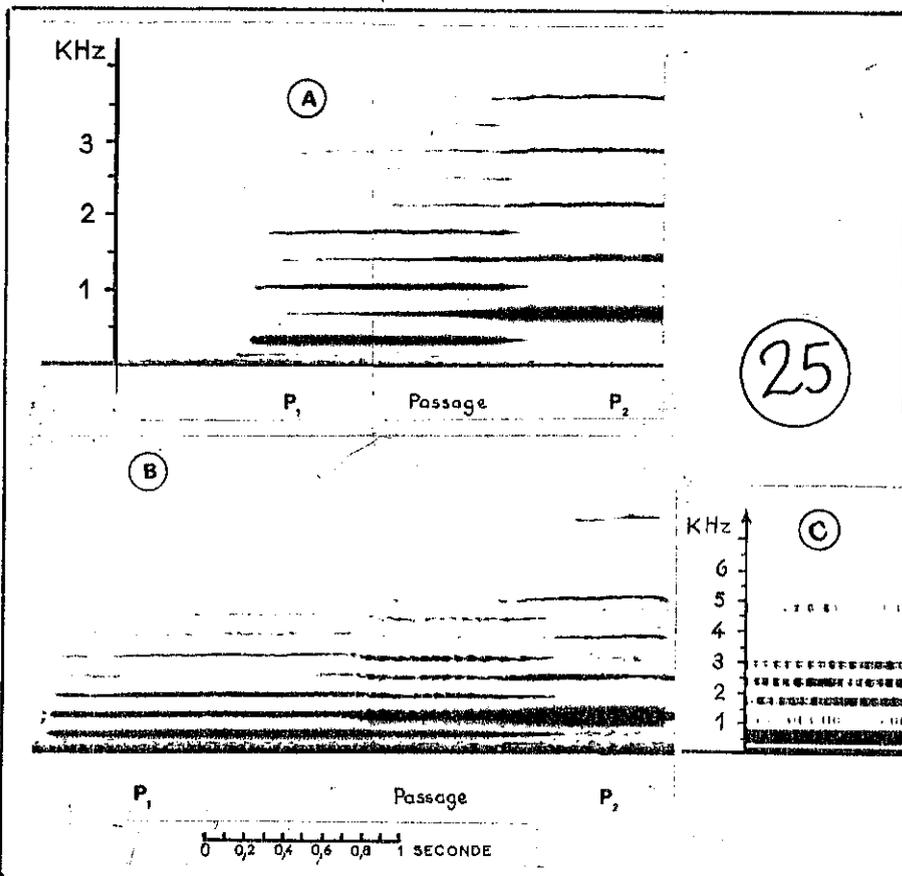
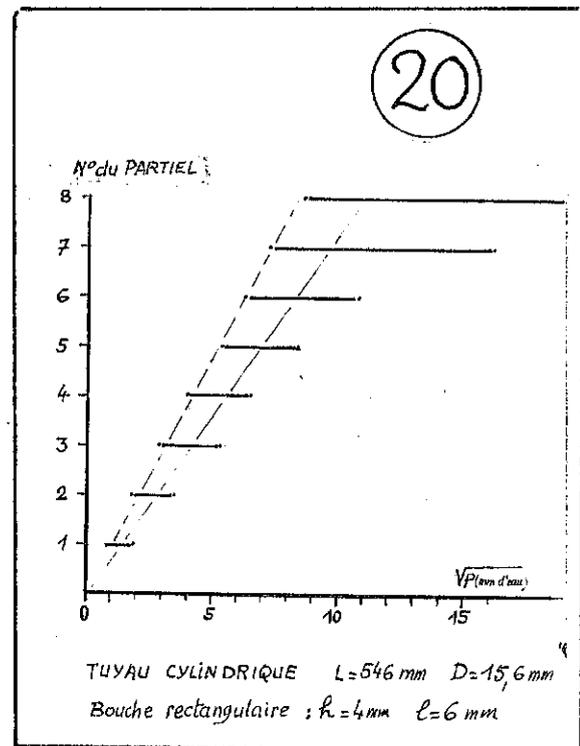
- l'augmentation du nombre des harmoniques,
- la croissance en intensité du fondamental et de certains des harmoniques,
- l'importance croissante des bruits de souffle,
- des battements ou grésillements, qui peuvent aussi se produire à l'approche
du passage au régime supérieur, dans une proportion qui dépend des rapports de
fréquence entre les 2 partiels.

D'une façon générale le timbre du son s'enrichit graduellement avec la pres-
sion, passe par un optimum puis se modifie et perd en stabilité à l'approche du chan-

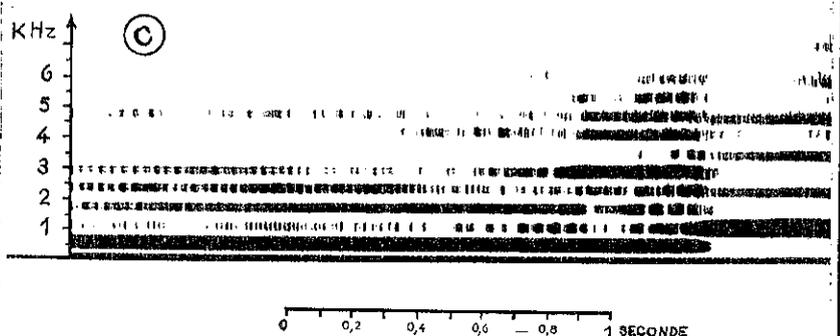
16



17



25



gement de régime.

Il existe donc une zone de pression optimale dans laquelle le tuyau fonctionne avec une intensité suffisante, et possède un son riche et stable. Cette zone " utile " permet de définir les champs de liberté en pression, en hauteur et en timbre.

§ 2.21 - Modification de l'attaque

Le changement de pression de l'air alimentant le tuyau modifie également la fréquence, l'intensité et le nombre des composantes du son de bouche. Voyons sur un exemple précis les modifications survenant à l'attaque.

Soit un tuyau d'orgue de taille moyenne, dont nous enregistrons le son de bouche isolé puis le son du tuyau pour trois pressions différentes dans la gravure. Au fur et à mesure que l'on augmente la pression, la fréquence du tuyau augmente, le spectre s'enrichit, et l'attaque change considérablement (fig.17).

fig.17

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 apparaît 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 et 6 sont prédominants pour l'oreille.

§ 2.22 - Zone utile de la courbe fréquence/pression d'une flûte à bec

Une flûte étant conçue pour fonctionner à pression variable, il est intéressant de définir avec assez de netteté la zone utile de la courbe de variation de la fréquence avec la pression, c'est à dire celle dans laquelle le son de l'instrument présente les qualités requises pour son utilisation musicale.

En considérant pour chaque grandeur (pression, fréquence, intensité), son intervalle de variation, sa situation sur une échelle absolue et sa loi de croissance, nous pourrions en tirer des données intéressantes pour qualifier l'instrument et comparer les instruments entre eux.

Examinons par exemple les relevés montrant l'évolution de l'intensité et du contenu harmonique au cours de l'augmentation de la pression d'alimentation d'une flûte à bec alto, pour la note DO₄ (fig.18).

fig.18
PL.13

La courbe de fréquence présente nettement deux parties : régime buccal jusque vers C et régime normal, de C vers K où se produit le saut au partiel suivant. Le raccordement des deux courbes se fait au voisinage de la fréquence de résonance du tuyau. La courbe d'intensité accuse encore plus nettement le changement. Il s'agit de déterminer la portion de la courbe CK qui est utilisable musicalement.

Enregistrons le son de l'instrument pour 11 valeurs de la pression. Précisons que ces enregistrements ont été faits en corrigeant l'amplification à l'entrée du magnétophone de façon à conserver 0 dB au modulomètre. Cette façon de faire est nécessaire, eu égard à la faible dynamique de l'appareil d'analyse, et ne gêne pas pour apprécier les intensités relatives des harmoniques. La figure 19 montre les sonagrammes de ces 11 enregistrements.

fig.19

Nous voyons bien qu'au delà de H des fluctuations rapides d'intensité apparaissent sur l'harmonique 2, le son devient instable, et sera rejeté pour l'utilisation musicale classique. On constate d'ailleurs que la courbe d'intensité relevée à la bouche décroît au delà du point H.

En deçà de C la composition spectrale se modifie rapidement pour de faibles variations de pression : c'est un son de bouche.

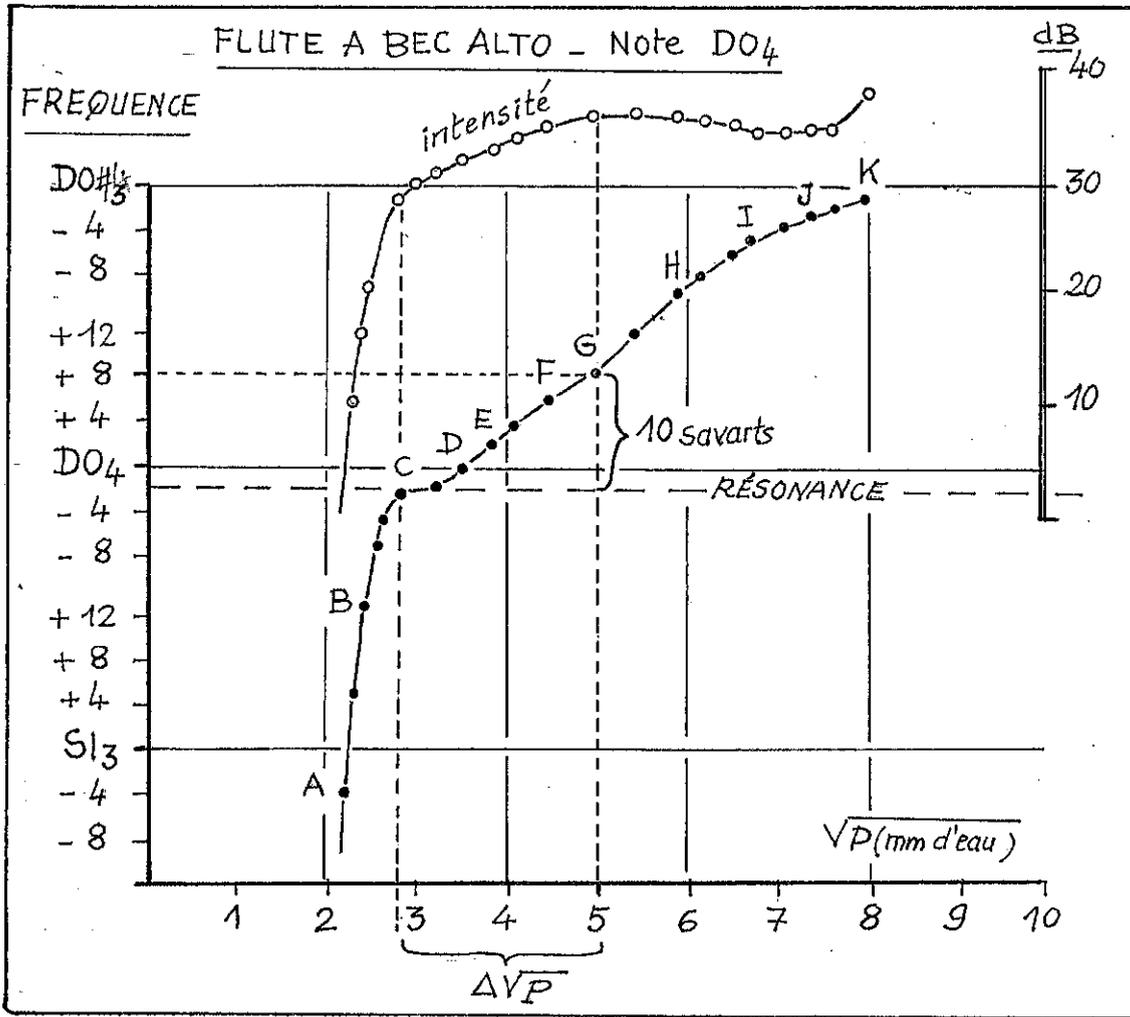
Il reste donc la portion CH dans laquelle on peut distinguer deux zones :

- DEF qui présente un timbre homogène; c'est la partie croissante de la courbe d'intensité à la bouche.
- GH qui coïncide avec l'apparition des harmoniques 3 et 6 et correspond à un palier de la courbe d'intensité.

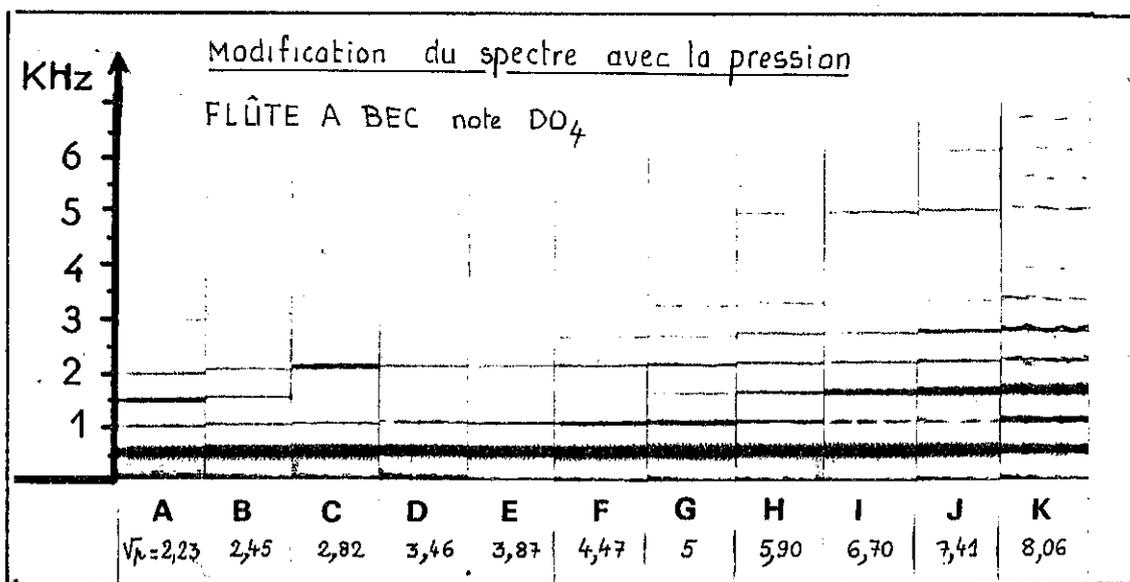
La zone utile de la courbe est donc principalement CG et pourra s'étendre jusqu'à H, selon la qualité de timbre que recherche le musicien. En s'en tenant à la première portion nous pourrions alors définir :

- L'intervalle de variation en fréquence de cette note
De (DO₄ - 2 sav.) à (DO₄ + 8 sav.) soit 10 savarts.
- son diapason moyen par rapport à la note correspondante de la gamme tempérée de référence. La note de cette flûte est plutôt haute car nous savons que le son optimum recherché par le musicien se situe de préférence vers la limite supérieure. De plus, lors du jeu normal à la bouche, l'augmentation de température accentuera encore cette tendance.

..../



18



19

- la "résistance" à la montée. Dans cette zone, la pente moyenne est $\Delta f / \Delta \sqrt{p} = 10/2 = 5$ ce qui est beaucoup plus considérable que pour le tuyau d'orgue précédent, environ le double.

- la zone d'existence en pression est ici $2,75 < \sqrt{p} < 5$

En pratiquant la même opération pour chaque note de l'instrument nous pourrions alors tracer les champs de liberté en fréquence et en pression et en tirer des conséquences relatives aux qualités de cet instrument : justesse, facilité de jeu, etc..

Voyons quelques exemples.

§ 2.23 - Pression d'obtention des divers partiels

Soit un tuyau cylindrique de taille fine ($l = 546$ mm $d = 15,6$ mm*) muni d'une bouche relativement basse (4×6). Nous sommes ainsi dans les meilleures conditions possibles pour obtenir un grand nombre de partiels.

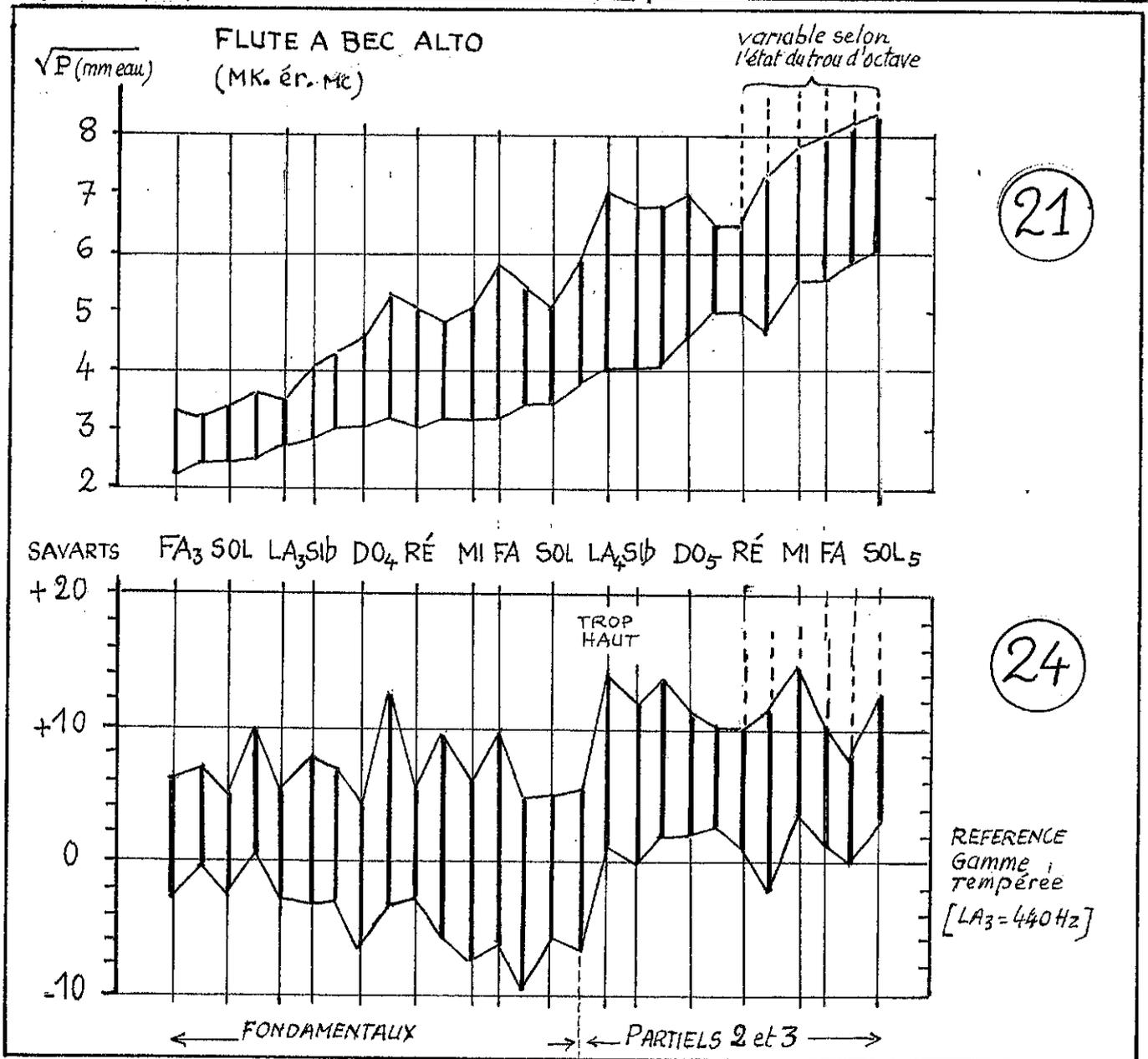
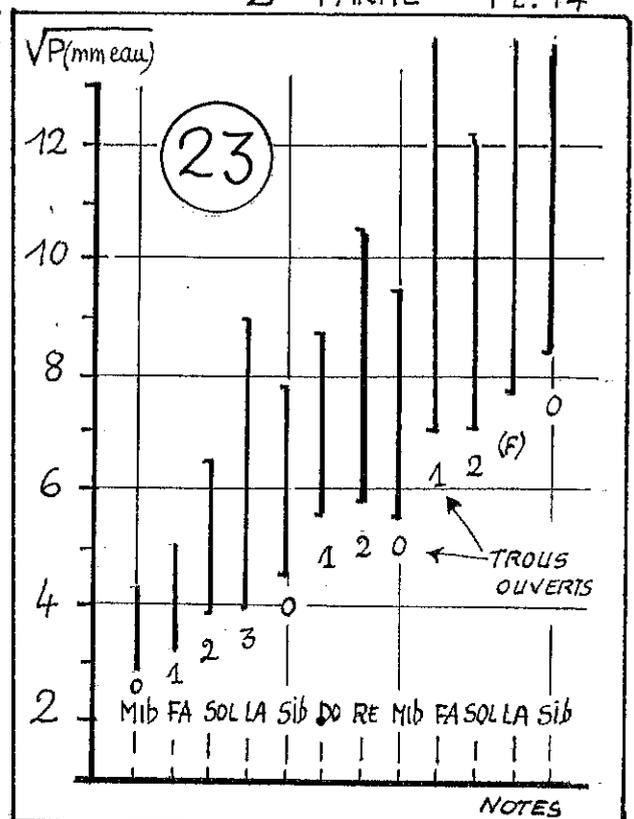
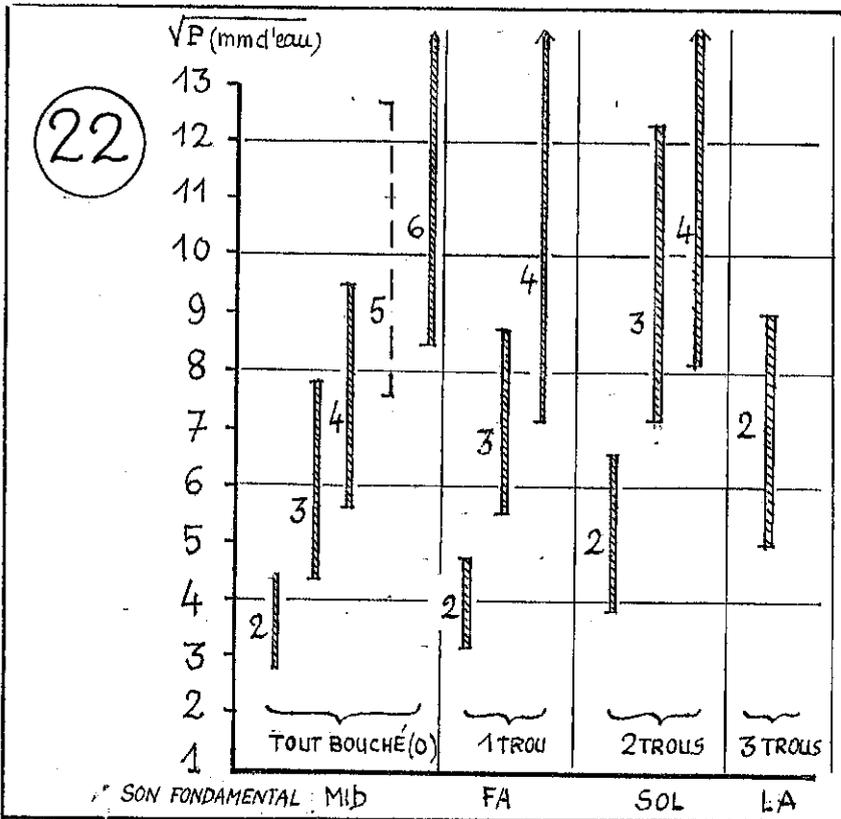
Faisons croître progressivement et régulièrement la pression et notons les valeurs pour lesquelles se produisent les sauts ascendants. Inversement, par décroissance continue de la pression notons les valeurs des sauts vers les partiels inférieurs. En portant sur un graphique les limites supérieures et inférieures de la pression pour chacun des partiels on constate : (fig.20)

fig.20
Pl.12

- 1°) Que les zones de stabilité en pression des partiels se recouvrent assez largement.
- 2°) Que la stabilité croît avec le n° du partiel, ce qui entraîne une extension grandissante des recouvrements et rend plus difficile l'accrochage sûr d'un partiel élevé.
- 3°) Que les pressions de passage aux régimes inférieurs s'alignent pratiquement sur une droite. L'entretien des partiels successifs est donc une fonction simple de la vitesse de l'air à la bouche.

Ces conditions peuvent être modifiées soit par les caractéristiques de la bouche (en particulier la hauteur de bouche) soit par tout ce qui retentit sur la justesse de partiels (irrégularités de la paroi, trous etc...)

* 15,6 mm



§ 2.24 - Champ de liberté en pression d'une flûte à bec

Voyons tout d'abord la flûte à bec baroque. C'est un cas relativement simple puisqu'à un doigté donné correspond un seul son à émettre.

On porte en abscisse les notes et en ordonnée la racine carrée de la pression. La fig. 21 montre le diagramme obtenu pour une flûte alto. Chaque trait vertical représente le champ de liberté en pression d'une note; l'ensemble constitue une zone dont l'allure est plus ou moins régulièrement ascendante avec la fréquence. On notera que l'augmentation de pression est plus rapide dans le deuxième registre de l'instrument où l'on utilise les partiels 2 et 3.

fig. 21
Pl. 14

La limite inférieure des sons les plus aigus dépend en partie de la quantité dont on découvre le trou d'octavation (voir § 3.21).

§ 2.25 - Champ de liberté en pression d'un galoubet

Cet instrument qui ne possède que trois trous est du type " flûte à partiels". Pour chaque doigté on utilise plusieurs partiels différents qu'on choisit par un coup de langue approprié. Il est donc important que ces partiels aient des champs de liberté en pression suffisamment distincts pour qu'il soit possible d'accrocher le numéro voulu sans risque d'erreur. On peut voir, fig. 22 la succession des partiels qu'il est possible d'émettre sur les quatre principaux doigtés. Le partial 5 du premier doigté (Mi b) a une zone d'existence en pression qui présente trop de points communs avec celles des partiels voisins; c'est pourquoi il n'est pas utilisé. On lui subsistue le partial 4 du troisième doigté qui a la même hauteur et dont l'émission est plus sûre.

fig. 22

Enfin il est préférable que la succession des champs de liberté de toute les notes de l'instrument présente, du grave à l'aigu une croissance assez régulière, ce qui en facilite l'apprentissage. On pourra en juger sur la fig. 23 ;

fig. 23

§ 2.26 - Champ de liberté en fréquence - flûte à bec

Ayant pour chaque note d'une flûte à bec déterminé la zone utile de la courbe fréquence/pression, portons sur un graphique les valeurs extrêmes de l'intervalle de fréquence exprimées en déviations par rapport aux notes de référence d'une gamme tempérée, base LA3 = 440 Hz. Nous obtenons ainsi le champ de liberté en fréquence de l'instrument.

fig.24
PL.14

En examinant la figure 24 où est représenté celui d'une flûte à bec alto, nous pouvons faire les remarques suivantes :

- Le champ de liberté est plus étroit dans le grave de l'instrument (environ 8 savarts) que dans le médium (10 à 15 savarts).
- On constate une cassure à partir du LA4, tout l'aigu de l'instrument étant situé au dessus de la référence. Si nous considérons celle-ci comme la justesse idéale nous pouvons en conclure que l'instrument est faux; il est possible évidemment de corriger la justesse en jouant à la limite supérieure du champ de liberté dans le grave, et au contraire à la limite inférieure à partir du LA4, mais ce sera au détriment de l'homogénéité en intensité et en timbre.
- Le diapason moyen de l'instrument, (ligne horizontale passant à travers tout le champ de liberté) peut se situer vers (+ 4) à condition de respecter les corrections que nous venons d'envisager. Même dans ces conditions le MI aigu (MI₅) est trop haut.

En résumé, le champ de liberté en fréquence est d'un grand intérêt sur le plan musical. Son étendue nous renseigne sur la marge de variation en fréquence laissée au musicien pour réaliser des fluctuations de hauteur, du vibrato. Sa situation par rapport à une référence absolue permet de tirer des conclusions concernant le diapason de l'instrument et sa justesse. L'établissement du champ de liberté en fréquence et son interprétation demandent toutefois certaines précautions que nous avons déjà évoquées dans la 1ère partie (§ 1.27). Nous y reviendrons à propos de la justesse des flûtes (§ 4.24).

§ 2.27 - Phénomènes transitoires liés au changement de régime

Nous savons que le passage d'un régime à un autre se produit, non pour une valeur définie de la pression, mais à l'intérieur d'une zone de pression commune aux deux régimes voisins. Lorsque par pression croissante on entre dans cette zone commune, le partiel supérieur dont les chances d'exister grandissent, commence à manifester son influence, et réagit sur la fréquence du partiel en cours d'émission. On constate, corrélativement d'importantes modifications dans le timbre du tuyau qui peuvent se ramener schématiquement à deux cas, selon que le rapport de fréquence entre les deux partiels voisins rentre ou non dans la série harmonique du partiel le plus grave.

a) Cas où les deux partiels sont justes

Si la pression croît trop rapidement, l'oreille ne peut analyser les phénomènes. On perçoit une sorte de " clic " au moment du saut.

Augmentons maintenant très progressivement la pression. Lorsqu'on entre dans la zone de transition il se produit une sorte de fusion entre les deux sons. On ne perçoit le passage qu'à l'augmentation progressive d'intensité des harmoniques paires du régime 1. Quand tous les harmoniques impairs ont disparu nous sommes dans le régime 2. L'analyse sonographique d'un tel passage est clairement lisible (fig. 25 A).

fig.25a
PL. 12

b) Cas où les deux partiels ne sont pas justes

Prenez maintenant un tuyau dont le partiel 2 est plus bas que l'harmonique 2 du partiel 1. A l'approche du changement de régime le son devient instable, puis la pression augmentant on voit apparaître des battements. Enfin, brusquement le partiel 2 s'établit.

Quelquefois il ne se produit pas de battements à proprement parler mais une succession d'interruptions périodiques qui affectent tous les harmoniques pairs du partiel 1, gênés par la proximité du partiel 2 sur lequel ils ne peuvent pas s'accorder. On voit sur la figure 25 deux exemples l'un de battements (c), l'autre d'instabilité avec interruptions (b).

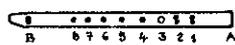
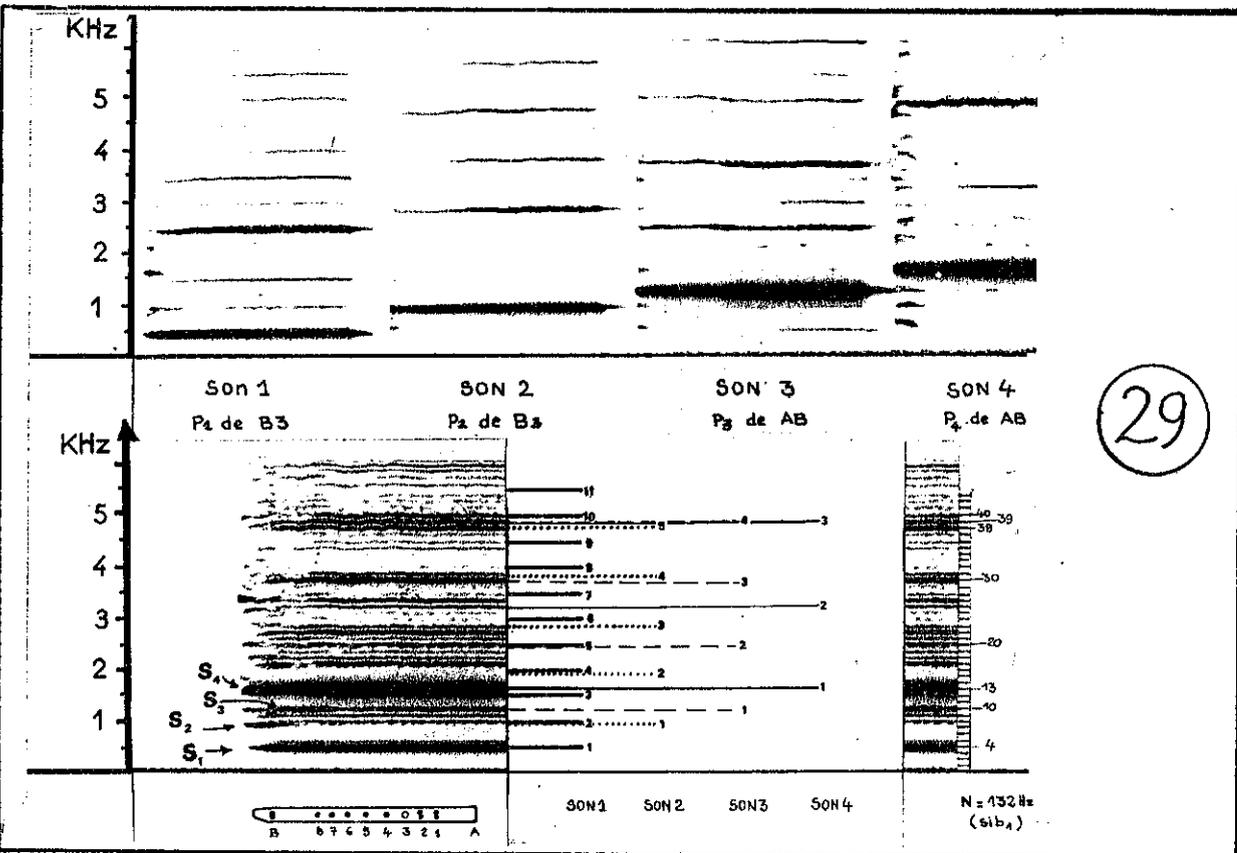
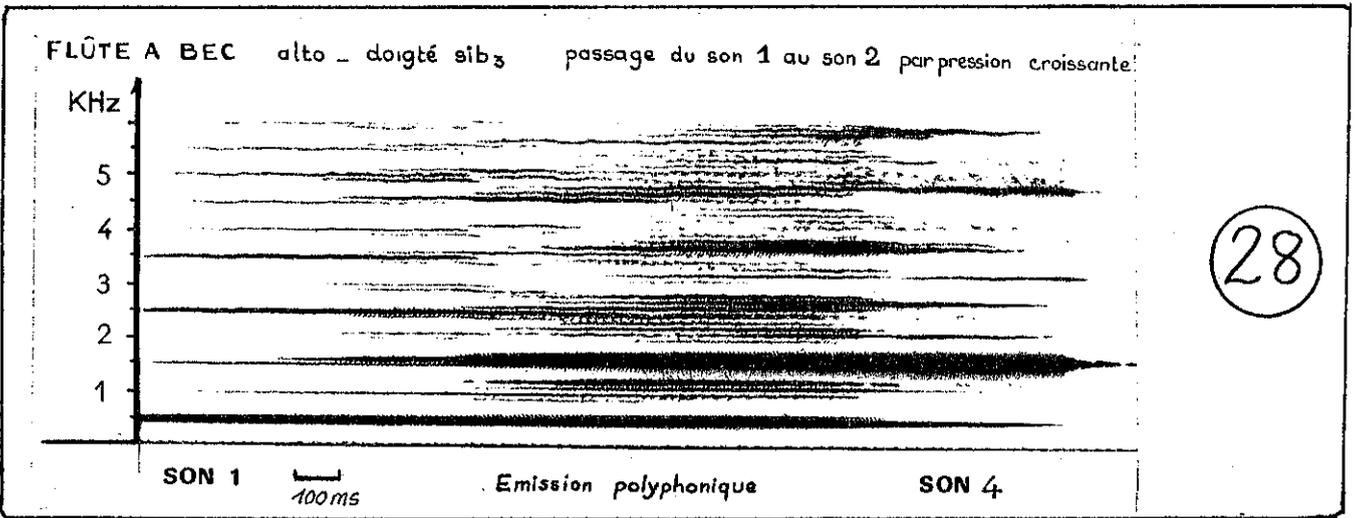
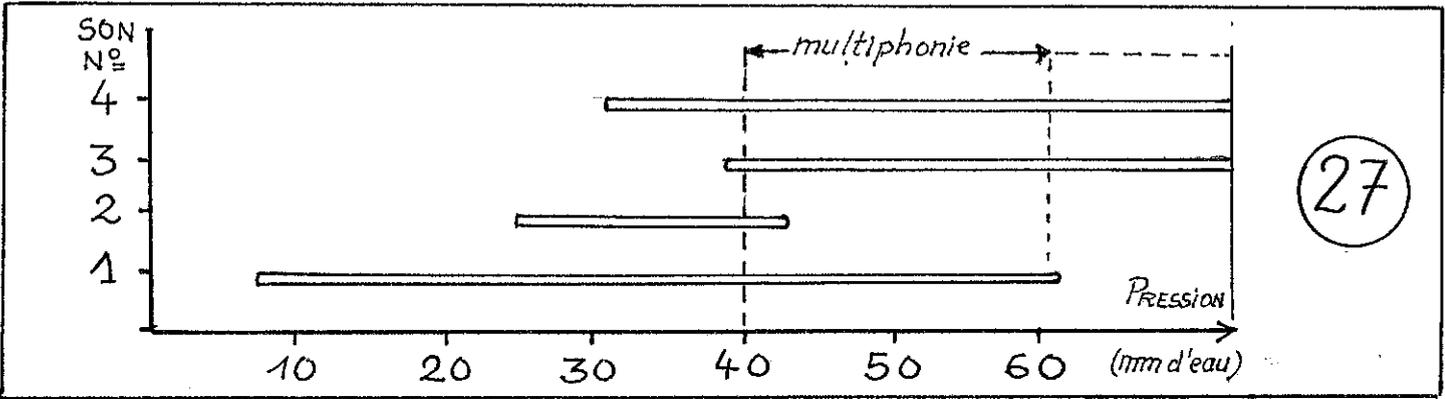
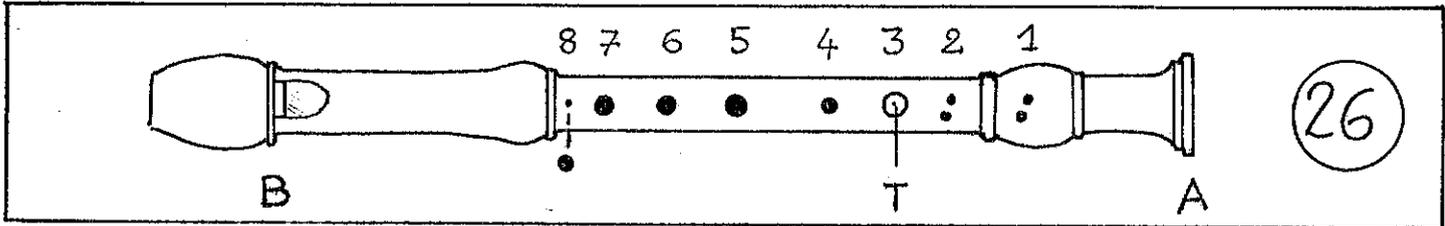
fig.25b
25c
PL. 12

A l'attaque comme au passage d'un régime à l'autre, c'est à dire dans les phénomènes transitoires, le tuyau et la bouche sont donc le siège de phénomènes compliqués. En effet, lorsqu'apparaissent les battements, d'ailleurs parfaitement stables si l'on maintient la pression adéquate, il faut bien admettre que le jet entretient simultanément le partiel 1 et le partiel 2, ce que ne peuvent encore envisager les théories actuelles du tuyau à bouche.

Il est vrai que jusqu'à maintenant ces phénomènes fugitifs étaient difficilement analysables avec les appareils classiques et que de plus, on évitait soigneusement dans le jeu des instruments à vent, les effets, jugés discordants, produits par la transition entre deux régimes. Il n'en est plus de même aujourd'hui où les compositeurs et les musiciens recherchent consciemment de tels effets (exploités çà et là dans les musiques ethniques de diverses cultures). Un flûtiste entraîné peut ainsi produire 2 ou 3 sons simultanés (ou plus) non harmoniques, clairement individualisés et perceptibles, et même " triller " avec ces sons. Cette véritable polyphonie ne se manifeste cependant que dans certaines conditions de fréquence des partiels et d'entretien à la bouche. Nous allons en examiner un exemple de plus près.

§ 2.28 - Coexistence de plusieurs partiels - polyphonie

En plusieurs endroits de ses ouvrages, BOUASSE a mis l'accent sur l'importance théorique de l'émission polyphonique des tuyaux à bouche (bib. (3) I § 101 (3) II § 43 (2) § 60) qu'il a étudiée à propos des tuyaux à cheminée principalement.



SON1 SON2 SON3 SON4

N = 132 Hz (sib₄)

Nous verrons effectivement (3ème partie § 3.46) que pour certains rapports de longueur de la cheminée et du corps d'un tuyau donné on peut entendre simultanément deux partiels voisins.

La première condition de réalisation de ce phénomène est donc bien l'existence, dans le tuyau de partiels suffisamment " faux " pour que, lors de l'émission simultanée il ne puisse pas se produire d'accommodation en fréquence les amenant à se confondre dans une série harmonique. C'est bien le cas des tuyaux à cheminée; mais on peut s'attendre aussi à rencontrer l'émission polyphonique dans un tuyau percé de trous de petits diamètres.

La deuxième condition concerne la bouche qui doit entretenir simultanément les partiels, ce qui n'est possible que lorsque ceux-ci ont une zone de pression commune.

Ce sont donc en définitive les conditions d'excitation qui vont décider de la possibilité de polyphonie. A la flûte traversière où l'embouchure est réglable par le musicien, il est relativement facile, en adaptant son jeu, de produire un grand nombre de sons multiples dont les compositeurs modernes s'efforcent de dresser le catalogue (BARTOLOZZI, GEAY et ARTAUD). Mais on peut aussi jouer des sons multiples à la flûte à bec et l'analyse en est facilitée par le fait que la bouche est fixe. Voici un exemple.

EXPERIENCE :

La flûte à bec baroque est, nous le verrons (§ 3.74 et fiche n° 6) un tuyau de perce compliquée constitué par le raccordement entre un cylindre et diverses portions tronconiques, percé de trous latéraux relativement petits et situés assez loin de l'extrémité inférieure pour certains doigtés de fourche. Ce sont des conditions idéales pour la production de partiels inharmoniques.

Jouons par exemple le Sib grave de la flûte alto ($Sib_3 = 466 \text{ Hz}$) pour lequel seul le 3ème trou est ouvert, et notons la succession des partiels possibles sur ce doigté. En nous limitant aux quatres premiers nous avons :

- | | | | |
|-------|------|----------------------|-------|
| son 1 | Sib3 | qui est le partiel 1 | de BT |
| son 2 | LA4 | qui est le partiel 2 | de BT |
| son 3 | DO#5 | qui est le partiel 3 | de AB |
| son 4 | SOL5 | qui est le partiel 4 | de AB |

fig.26
PL.15

Relevons maintenant le champ de liberté en pression de chacun de ces partiels. Nous obtenons la figure 27 où l'on constate une large zone de pression commune aux sons 1 et 4, et, dans une moindre mesure, 2 et 3.

Si maintenant nous jouons le son le plus grave, $S1b3$ et que nous augmentons progressivement la pression, nous entendons effectivement les sons 2, 3 puis 4 apparaître sans pour autant que le son 1 disparaisse, comme on peut le voir sur le sonagramme de la fig. 28.

fig.28

Essayons d'analyser plus en détail le passage multiphonique. En regard du sonagramme (fig.29) nous avons repéré les fréquences de chacun des quatre sons, y compris leurs harmoniques. Les fréquences restantes proviennent de sons de combinaison additionnels et différentiels) entre les partiels. Ils sont particulièrement nombreux entre 1000 et 3000 Hz et forment, avec les autres fréquences un spectre de raies serrées, équidistantes par endroit, qui pourraient être les harmoniques d'un son très grave. C'est bien ce qui semble effectivement se produire. A l'extrême droite de la figure nous avons dessiné les harmoniques d'un son de 132 Hz (voisin de $S1b1$) auxquelles on peut rapporter à peu près toutes les fréquences existantes dans le passage polyphonique. On constate ainsi que les sons 1 et 4 sont respectivement comme les harmoniques 4 et 13 (et leurs multiples) du son de 132 Hz. Par contre, le son 2, n'a que l'harmonique 5 commun avec l'harmonique 38 du son grave, ses harmoniques 1 et 3 qui coexistent, provoquent des battements. De même, le son 3 ne rentre pas dans la série. Son harmonique 4 est commun avec le 39ème du son grave, mais ses autres composantes provoquent aussi des battements ou disparaissent.

fig.29

En résumé, lors de l'émission polyphonique, les partiels tendent à se synchroniser au mieux sur les harmoniques d'un son plus grave dont le fondamental est le plus grand commun diviseur (PGCD) d'au moins une des composantes de chacun des partiels. Il subsiste néanmoins un certain nombre de battements qui montrent bien que le phénomène n'est pas vraiment périodique.

§ 2.29 - Conclusions

L'étude spectrographique a permis de mettre en évidence les phénomènes compliqués se produisant lors des régimes transitoires du tuyau à embouchure de flûte, soit à l'attaque, soit au moment du passage d'un régime à l'autre.

On a vu que la bouche est le siège de phénomènes compliqués comme la coexistence du son de bouche dans le son du tuyau et l'entretien simultané de partiels inharmoniques. En fait les théories actuelles du fonctionnement du tuyau à bouche ne sont valables que pour un son entretenu et ne peuvent s'appliquer qu'au fondamental du tuyau dépourvu d'harmoniques. Elles sont encore bien loin de rendre compte de la réalité ordinaire du fonctionnement d'un tuyau à bouche.

CHAPITRE III

PROBLEMES POSES PAR L'ETUDE DES PARAMETRES LIES A LA BOUCHE

§ 2.30 - Tableau des paramètres liés à la bouche.

Le système d'excitation des tuyaux à bouche doit remplir trois objectifs principaux :

- la fourniture d'air comprimé à la pression et au débit requis,
- la formation d'un jet,
- une liaison convenable entre le jet et le tuyau.

Tableau
(dans le
texte)

Le détail des paramètres est donné par le tableau où l'on a indiqué par une zone hachurée ceux dont le réglage est laissé au musicien, ceci pour trois types principaux d'instruments : le tuyau d'orgue, la flûte à bec, la flûte traversière.

TUYAU D'ORGUE : le musicien exécutant fait sonner des tuyaux dont toutes les qualités sonores ont été réglées à la construction et à l'harmonisation - Il n'a aucune action sur le timbre, excepté dans le cas d'un orgue mécanique à traction directe où la rapidité d'enfoncement de la touche peut conditionner en partie le transitoire d'attaque.

FLÛTE A BEC : le musicien règle essentiellement la pression de l'air alimentant l'instrument, et en partie le débit qu'il peut seulement diminuer en obstruant l'entrée du bec. Tous les autres paramètres sont fixés par le facteur.

FLÛTE TRAVERSIERE : tous les paramètres de l'excitation sont contrôlés par le musicien, en cours de jeu.

Les incidences d'un paramètre sur la fréquence, l'intensité et le timbre d'un son donné sont transposables du tuyau d'orgue à la flûte traversière, étant donné que le schéma de fonctionnement est toujours celui d'un système lame-d'air biseau. On voit donc l'intérêt qu'offre l'étude des tuyaux d'orgue dont toutes les parties sont mesurables et où les phénomènes étant quasi reproductibles, se prêtent à une étude de physique expérimentale.

Mais contrairement au tuyau d'orgue construit pour émettre un seul son et réglé pour parler à pression constante, une flûte doit fonctionner sur une grande

...../

étendue de fréquence, à divers régimes et par conséquent à pression variable. L'accroissement de la tessiture est d'ailleurs directement liée au nombre de paramètres contrôlés par le musicien. Il faudra donc considérer, en plus des études faites avec le tuyau d'orgue, les incidences des différents paramètres sur les champs de liberté

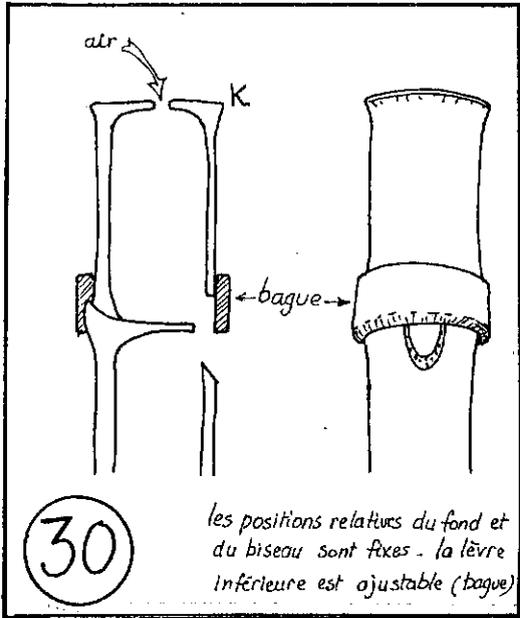
PARAMETRES LIÉS A LA BOUCHE : Réglages laissés au musicien			TUYAU D'ORGUE	FLUTE A BEC	FLUTE TRAVERSIERE Flûte oblique	
FOURNITURE D'AIR COMPRI ME	PRESSION	Lois d'établissement de la pression (ouverture de la soupape, coup de langue)	(1)	(asso- ciés (2)		
		Valeur moyenne				
	DEBIT	Réglage				
FORMATION D'UN JET	CONDUIT	Forme	(1)	(asso- ciés (2)		
		Longueur				
	FORME DE L'AJUTAGE (diffusion, direction du jet)	Forme géométrique de la lumière Etat des bords de la lumière (épaisseur, état de surface)				(3)
LIAISON JET-TUYAU	Pareois latérales de la bouche (oreilles)		(1)	(asso- ciés (2)	(3)	
	Positions relatives lumière-biseau (= direction du jet par rapport au biseau)					
	Distance lumière biseau (hauteur de bouche)					
	Surface de la bouche (domaine du tuyau)					
	Epaisseur du biseau (qualité du feed-back)					

 Paramètres fixés lors de la construction de l'instrument et de l'harmonisation.

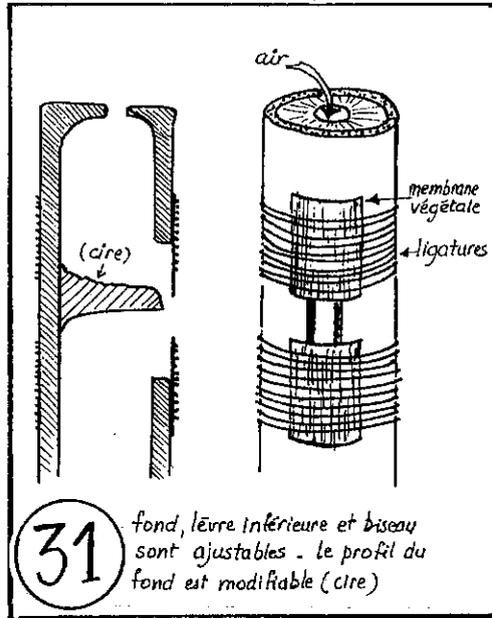
(1) en partie réglable dans un orgue mécanique à traction directe.

(2) le débit peut à la rigueur être diminué, indépendamment de la pression, par obstruction partielle de l'ouverture d'entrée du bec.

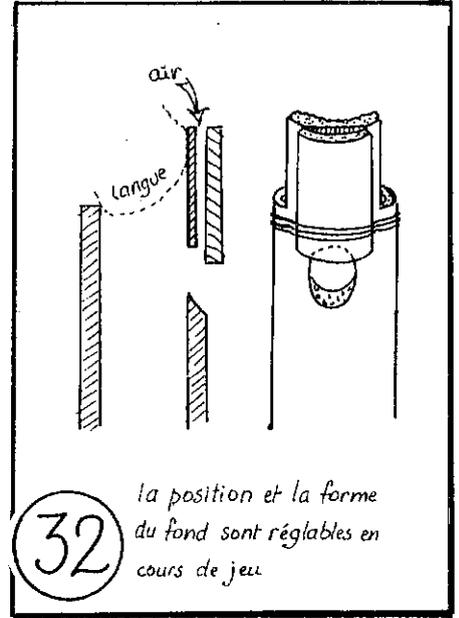
(3) dépend des particularités anatomiques du joueur.



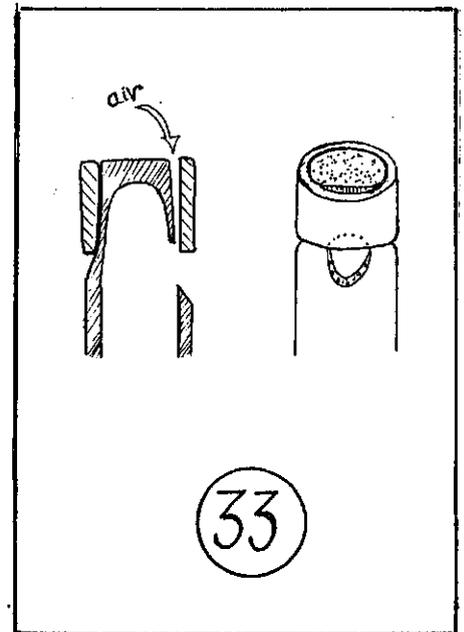
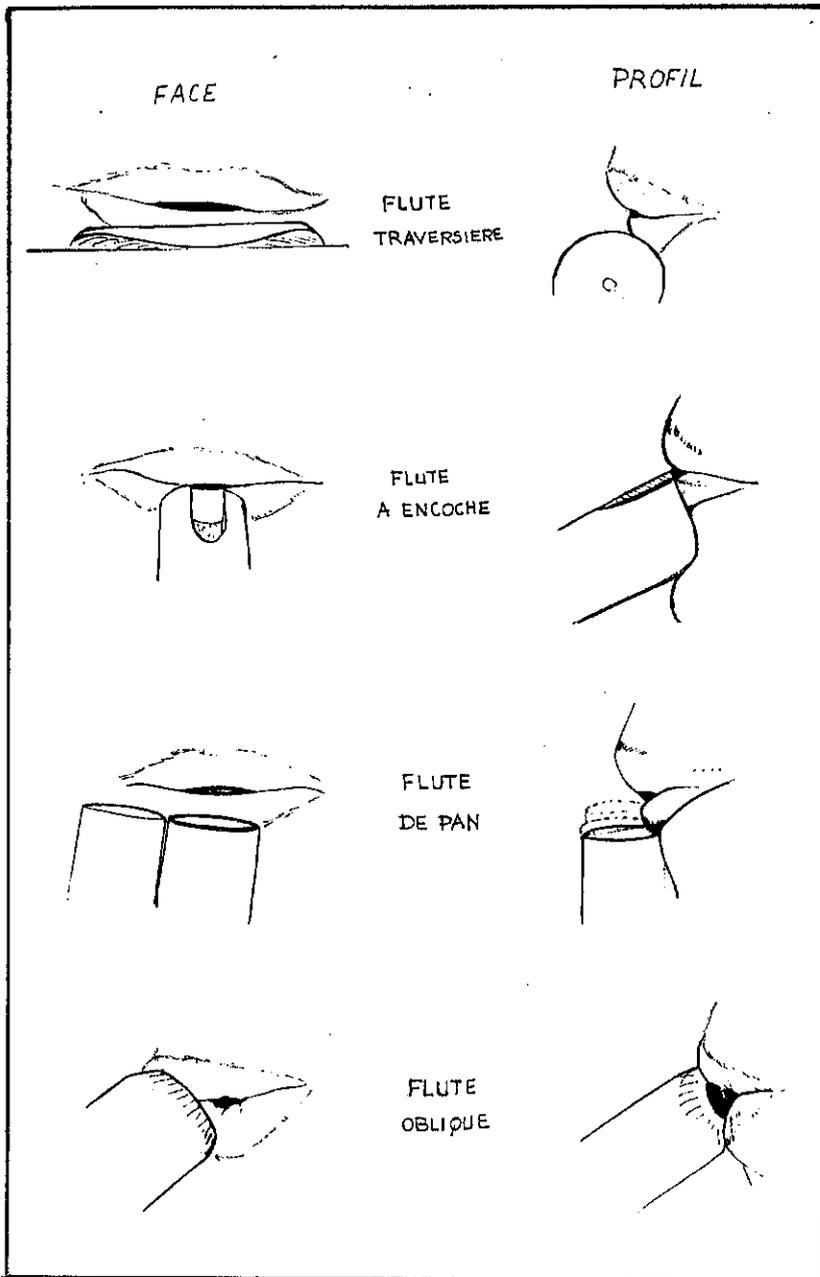
les positions relatives du fond et du biseau sont fixes - la lèvre inférieure est ajustable (bague)



fond, lèvre inférieure et biseau sont ajustables - le profil du fond est modifiable (cire)



la position et la forme du fond sont réglables en cours de jeu



34

en pression et en hauteur des partiels ainsi que les problèmes d'homogénéité de timbre et d'intensité entre le grave et l'aigu, sur toute l'étendue de l'instrument.

N.B. : L'instrument " orgue " qui groupe plusieurs centaines de tuyaux recouvrant pratiquement toute l'aire audible pose évidemment un grand nombre de problèmes que nous ne pouvons aborder ici. Dans la 4ème partie nous donnons un aperçu des problèmes qui lui sont propres.

§ 2.31 - Principaux types d'embouchures de flûtes

La réalisation pratique des diverses sortes de flûtes a donné lieu à des systèmes d'embouchures d'aspects très divers, mais qui, en dernière analyse, peuvent se ramener sur le plan du fonctionnement acoustique, à quelques types fondamentaux.

Considérons tout d'abord les instruments du type flûte à bec.

La bouche dont la réalisation est la plus élémentaire est celle de la " flûte à bloc ". Sa construction est extrêmement simple avec du roseau, puisque la plante offre naturellement un tuyau creux et des cloisons. On peut procéder comme suit (fig. 30). Découpons dans la paroi d'un roseau, au niveau d'un noeud, une ouverture latérale de forme quelconque (circulaire, rectangulaire...) de part et d'autre du noeud, puis préparons une rondelle avec un roseau de diamètre légèrement supérieur. En enfilant cette rondelle sur le premier roseau nous réalisons une bague coulissante avec laquelle nous recouvrons en partie le trou; un peu de cire assurera l'étanchéité. En réglant la position de la bague de façon adéquate puis en soufflant sans précaution particulière par l'extrémité K nous obtenons un son.

Il est plus pratique de boucher en partie ou même totalement, l'extrémité K, quitte à repercer un trou latéral pour insuffler l'air, ce qui peut faire croire à une flûte traversière. On peut prévoir également un réglage pour le biseau en le réalisant au moyen d'une membrane appliquée sur le trou par une ligature (fig.31). Enfin si nous substituons au conduit circulaire un conduit conique divergent : nous arrivons peu à peu au tuyau d'orgue moderne.

L'instrument est simple à faire et, particularité intéressante, la bouche est réglable. Mais il ne fonctionne vraiment bien que dans une gamme de pression peu étendue. L'étape suivante est celle de la réalisation d'un canal convergent produisant un jet plus stable. On peut en voir deux exemples fig.32 et fig.33. Dans le dernier cas, c'est la langue qui obstrue l'extrémité du tuyau ce qui offre un réglage supplémentaire, analogue à celui du bouchon de la flûte traversière.

L'examen de flûtes provenant de divers pays montre la diversité apparente

de la réalisation pratique d'un bec, c'est-à-dire la partie de l'instrument qui a pour fonction de former un jet de dimension et de direction appropriées (Bib. MOECK). Lorsque c'est l'homme qui produit le jet, les types d'embouchures présentent des aspects très divers selon que l'air est insufflé par la bouche ou par le nez, et selon que le tuyau est excité en bout ou transversalement. Mais si l'on essaye, abstraction faite du style de musique, de reconnaître tel ou tel de ces instruments, on risque de commettre bien des erreurs : on reconnaît l'anche double de l'anche simple, mais difficilement la flûte à encoche de la flûte traversière ! De même, une flûte nasale pourra passer pour une flûte traversière jouée très doucement. Il semble que seule la flûte oblique offre suffisamment d'originalité pour ne pas risquer d'être confondue avec une autre. En fait, la partie de l'instrument fonctionnellement la plus importante de toutes est de loin la lumière, c'est-à-dire l'orifice de sortie du jet. De la forme de cet ajutage vont dépendre la formation du jet, sa cohésion, sa direction... et finalement le son de l'instrument en grande partie.

§ 2.32 - Description des types fondamentaux d'embouchures de flûte

Une première distinction doit être faite entre les instruments dans lesquels la forme et la direction du jet sont entièrement déterminées par les dispositions géométriques de l'embouchure et ceux où le jet est contrôlé par le musicien.

Dans la première catégorie se trouvent :

- La tuyau d'orgue en métal dont on connaît bien les diverses parties et leur agencement. La lumière est un rectangle très allongé dont le rapport L/l de la grande à la petite dimension est compris entre 50 et 100.
- La flûte à bec qui possède un conduit convergent contribuant à la formation du jet. La lumière peut prendre diverses formes mais elle est généralement plus longue que large : c'est un rectangle plat ou curviligne ou encore une demi-lune. Dans l'instrument européen, le rapport L/l est de l'ordre de 15 à 20.

Dans la deuxième catégorie on trouve une grande variété de types d'embouchures plus ou moins bien connus puisqu'une partie échappe à l'observation (intérieur de la bouche du flûtiste) et se prête difficilement à des mesures. La diversité en est très grande, en raison principalement de la variété des conformations anatomiques des joueurs.

En nous limitant à quatre grands types principaux nous distinguerons :

fig.34 - La flûte traversière. Sur des photos prises en cours de jeu (fig.34), on peut voir

...../

que la lumière est une ouverture très allongée, de forme plus ou moins régulière. Le conduit contribuant à la formation du jet, constitué par l'espace laissé entre la langue d'une part, le palais et les dents d'autre part, dépend grandement de l'anatomie du joueur et de ses habitudes posturales.

- La flûte oblique (Ney) - jeu extérieur

fig.34

Le jeu de cet instrument est mal connu. Autant que l'on puisse s'en assurer en observant les musiciens iraniens que nous avons pu voir de près, la forme de la lumière n'est pas fine et allongée comme dans la flûte traversière, mais plutôt quasi circulaire (fig.34). Nous n'avons pas de données sur la position de la langue dans la bouche.

- jeu intérieur

En Iran et dans les régions voisines on joue également de cet instrument en introduisant l'extrémité entière de la flûte dans la bouche. La langue joue ici un double rôle : elle permet d'obstruer en grande partie l'extrémité du tuyau et en même temps de diriger convenablement le jet sur son bord extérieur aminci (biseau). A défaut de données précises sur la forme du conduit et celle de la lumière nous ne pouvons pas étudier ce type d'embouchure. Précisons toutefois qu'on l'utilise plus volontiers pour émettre les fondamentaux graves de l'instrument qui se produisent avec assez d'intensité bien que la taille du tuyau soit très fine. L'émission est accompagnée d'un bruit d'écoulement important.

- La flûte à encoche

Sur le dessin de la figure 34 réalisé à partir d'une photo on peut voir que la forme de la lumière est très semblable à celle que l'on observe avec la flûte traversière. Le fait que le tuyau soit excité au bout ou latéralement ne constitue pas une différence fondamentale entre les deux instruments. Ce que nous dirons de la flûte traversière, quand à l'embouchure, pourra être transposé à la flûte à encoche.

- La flûte nasale

Dans cet instrument, le conduit formé par une narine, et la lumière qui en est l'orifice varient énormément d'un individu à l'autre. Le jet d'air ainsi produit est relativement " mou " (grand débit et faible pression). Il tombe sur le bord d'un trou situé soit au bout de l'instrument soit latéralement. On a donc là aussi une flûte droite et une flûte traversière, selon la position du trou d'embouchure.

N'ayant pu observer de près des joueurs de flûtes nasales nous avons dû laisser de côté également ce type d'instrument.

Nous avons donc limité notre étude aux instruments que nous connaissons le mieux et pour lesquels nous avons été en rapport avec des musiciens et des facteurs;

...../

ce sont la flûte à bec, la flûte traversière et l'orgue.

Les expériences faites sur des tuyaux d'orgue permettent d'étudier le rôle de chacun des paramètres dans les meilleures conditions possibles de reproductibilité. Cependant chaque tuyau n'est construit et réglé que pour émettre un son unique à pression constante.

La flûte à bec et plus particulièrement l'instrument qui connut son apogée en Europe vers 1700 permettra de dégager le rôle des différents paramètres sur une étendue sonore de 2 octaves et de mettre en évidence les compromis auxquels on ne peut échapper dès que la bouche doit fonctionner dans ces conditions.

Enfin, à la lumière des idées dégagées de l'étude de ces deux instruments nous pourrions aborder la flûte traversière où la plupart des paramètres sont réglables par le musicien ce qui en rend l'étude particulièrement délicate, d'autant que plusieurs paramètres sont indissociablement liés.

§ 2.33 - Problèmes posés par les paramètres associés

Une des plus grandes difficultés rencontrées dans l'étude des paramètres de l'embouchure provient du fait que la variation de certains d'entre eux entraîne ipso-facto la variation d'un ou deux autres paramètres qui leurs sont liés.

Un exemple significatif de ce point de vue est l'étude de la distance lumière-biseau. C'est, comme nous le verrons, un des paramètres les plus importants de l'embouchure. Or, augmenter la distance lumière-biseau, c'est-à-dire éguuler un tuyau d'orgue ou découvrir l'embouchure en flûte traversière, c'est du même coup accroître la surface de la bouche, ce qui a des conséquences importantes sur les rapports de fréquence des partiels (3ème partie § 3.02).

Donnons un autre exemple. Il serait intéressant, avec deux flûtes à bec, de comparer, toutes choses égales par ailleurs, deux lumières de formes différentes, l'une peu épaisse et très large, l'autre quasiment carrée. S'il est possible de régler les deux bouches pour qu'elles aient même débit et même angle jet/biseau, nous serons contraints de choisir entre deux alternatives et donner à ces deux bouches :

- soit la même distance lumière-biseau, mais leurs surfaces seront différentes,
- soit la même surface, et c'est la distance lumière-biseau qui changera.

L'étude de chacun des paramètres isolément n'est donc pas toujours réalisable expérimentalement.

CHAPITRE IV

QUELQUES PARAMETRES DETERMINANTS DU FONCTIONNEMENT DES TUYAUX A BOUCHE

Pour plus de commodité nous regrouperons l'étude des paramètres selon deux rubriques :

- d'une part les paramètres qui régissent la fourniture d'air comprimé et la formation du jet,
- d'autre part ceux qui réagissent sur la liaison entre le jet d'air et le tuyau.

Etant donné que le système contribuant à la formation d'un jet forme un tout bien particulier pour chaque type d'instrument nous examinerons successivement :

- le pied du tuyau d'orgue
- le bec de la flûte à bec
- la bouche du flûtiste (flûte traversière occidentale).

A - FOURNITURE D'AIR COMPRIME ET FORMATION DU JET

1) LE PIED DU TUYAU D'ORGUE

§ 2.34 - Réglage du débit et de la pression de l'air - Rôle du pied

Les tuyaux d'un orgue placés sur une même gravure, bien qu'étant de dimensions fort différentes sont alimentés par le même vent. Le pied est en quelque sorte un robinet donnant la possibilité de régler pour chaque tuyau la quantité d'air nécessaire, à la pression convenable.

Dans les tuyaux en étain, le pied est un conduit conique divergent percé d'un orifice circulaire à sa base : le trou du pied, et d'une fente étroite à sa partie supérieure : la lumière. La quantité d'air (Q) sortant de la lumière dépend de la surface de celle-ci (s) et de la vitesse de l'air (v) selon la relation

$$Q = s \times v \quad (\text{fig.35}).$$

fig.35
PL. 17

La vitesse à la lumière est liée à la pression de l'air dans le pied. A l'orifice du pied, l'air entrant est à la pression de la gravure; il subit alors

.... /

une détente qui est d'autant plus importante que le rapport s/o de la surface de la lumière à celle du trou du pied est petit.

En ouvrant le pied, l'harmoniste accroît le débit d'air fourni au tuyau; à la lumière, (v) augmente et (Q) également. Cette opération agit essentiellement sur l'intensité du son.

En agrandissant la lumière l'harmoniste fait une opération plus complexe; (s) croît, mais (v) décroît. Q peut changer ou non mais le son du tuyau est presque toujours modifié de façon considérable.

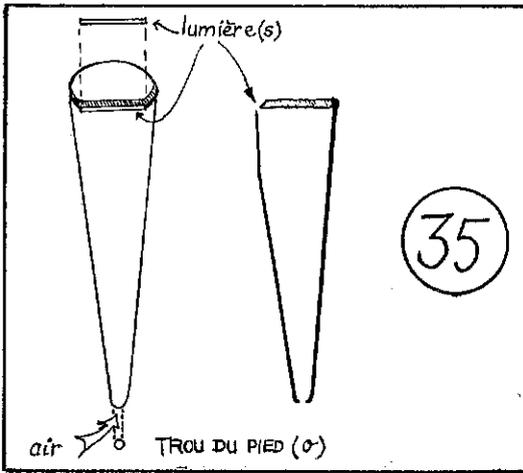
Les expériences suivantes vont permettre de poser le problème et d'analyser les conséquences sonores de ces différentes actions.

- Expérience N° 1 :

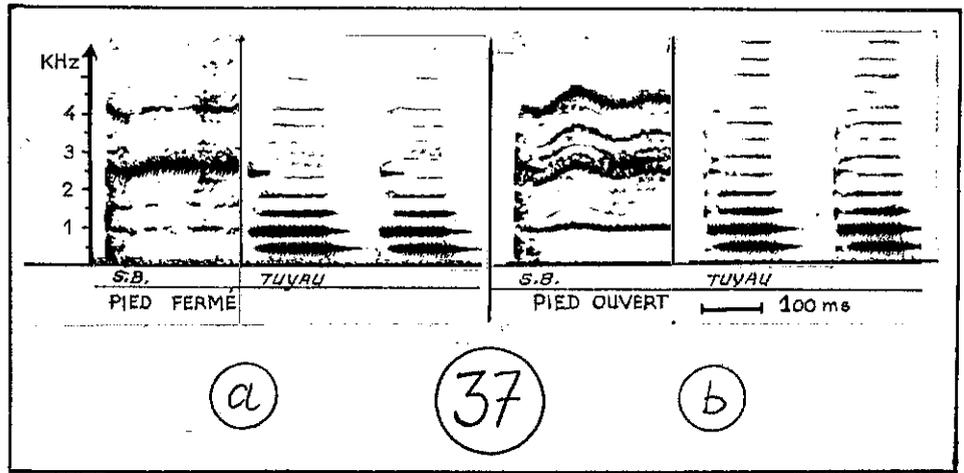
Un tuyau ouvert de taille moyenne donnant la note $Mi_4 = 660$ Hz est placé sur le sommier expérimental.

- fig. 36
- a) La pression dans la gravure est de 80 mm d'eau. Dans le pied on mesure 46 mm d'eau. Le tuyau est riche en harmoniques (fig.36) mais a tendance à octaviser au moment de l'attaque. Essayons de réduire un peu la quantité d'air qui l'alimente.
 - b) Fermons l'orifice du pied. La pression tombe à 33 mm d'eau dans le pied. L'attaque du tuyau n'est guère améliorée. Bien que l'intensité de l'harmonique 2 ait diminué la sensation d'octavisation n'a pas disparu car le fondamental s'établit toujours avec un grand retard. Les sons de bouche ont une importance notable.
 - c) Agrandissons la lumière : l'attaque est bien meilleure. Le fondamental s'établit assez rapidement pour empêcher l'octavisation. D'ailleurs les sons de bouche ont disparu. On constate par contre l'apparition de bruits d'écoulement dus au son de bouche.
 - d) Comme l'expérience le permet, modifions la pression dans la gravure. On peut voir que le résultat n'est pas identique à b) car, si la pression dans le pied est la même dans les 2 cas, l'établissement se fait beaucoup plus rapidement en d) où le pied est resté ouvert. Nous reviendrons sur ce point à propos de l'expérience suivante.

Bref, le choix de l'une ou l'autre de ces actions dépend du son que l'on veut obtenir. Dans le cas considéré (tuyau octaviant), l'action à entreprendre aurait dû porter plutôt sur l'orientation du jet. Mais l'expérience reste tout de même intéressante. On a pu voir que pour une même pression dans le pied le tuyau sonnait différemment.



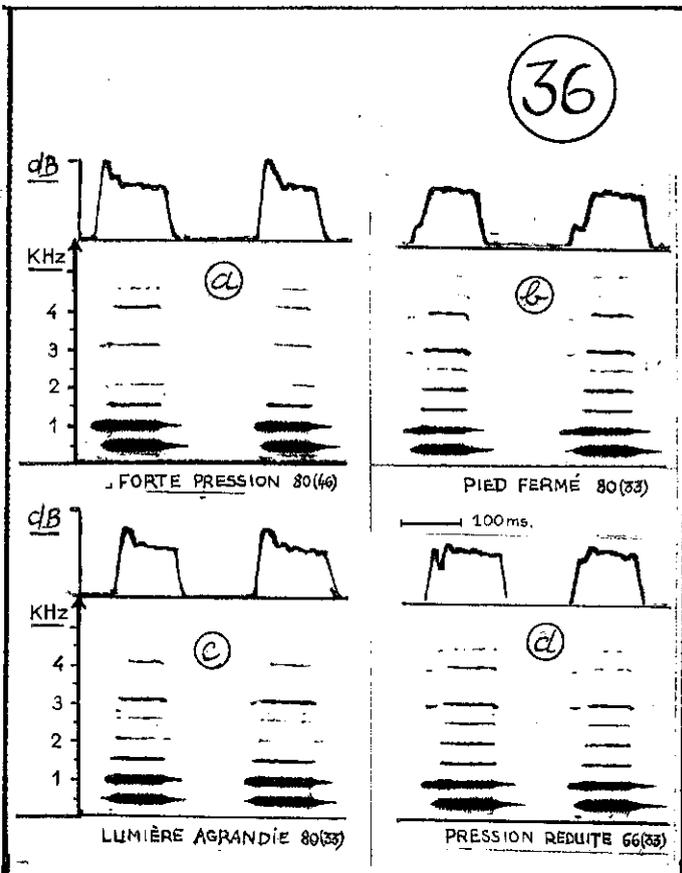
35



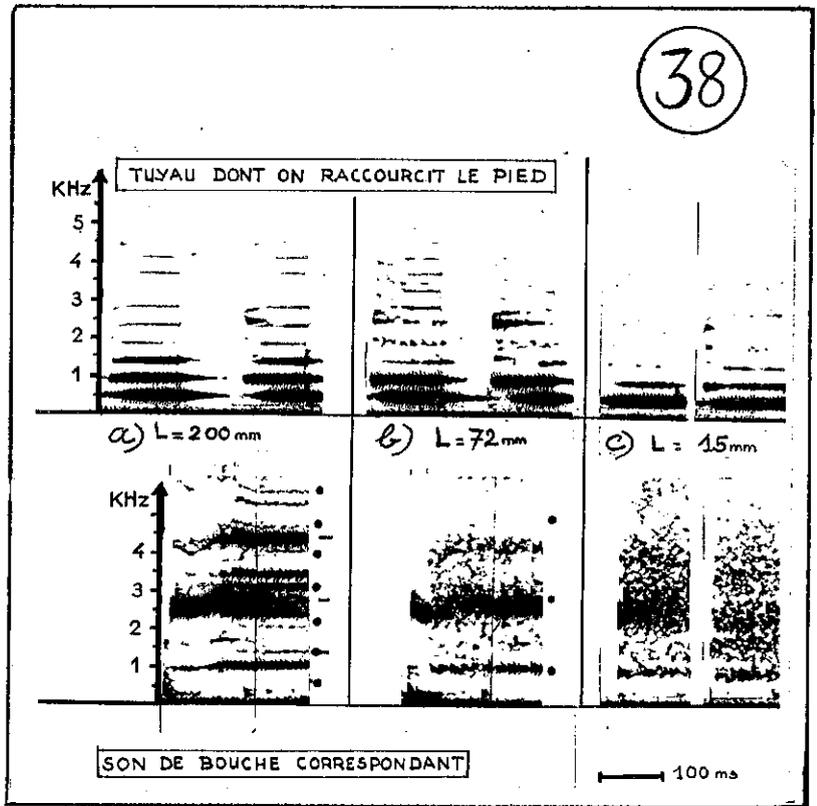
a

37

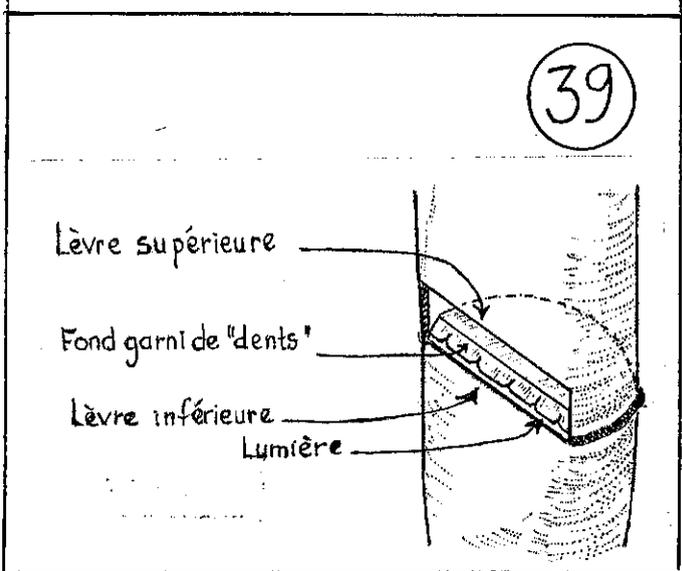
b



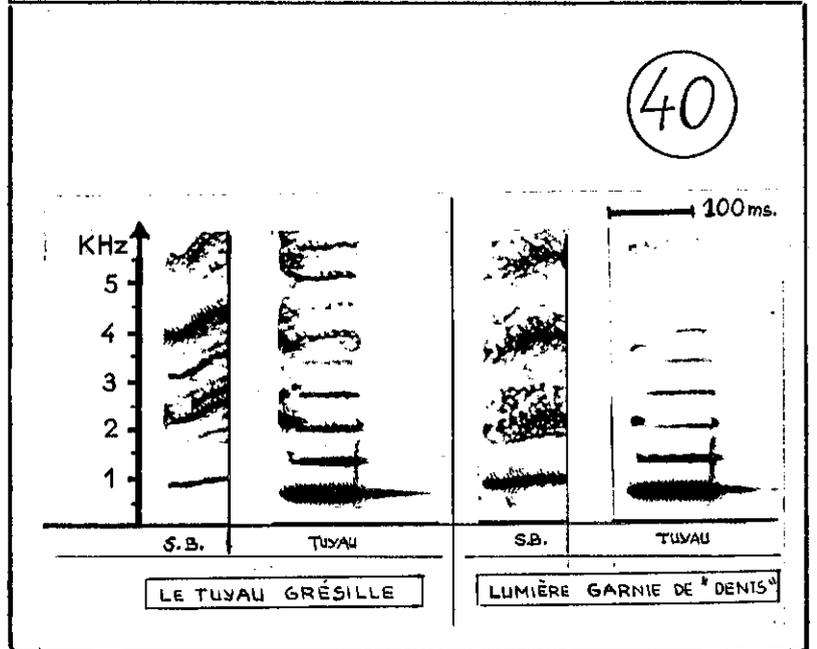
36



38



39



40

- Expérience N° 2 :

Même pression dans le pied : pied plus ou moins ouvert à sa base. Prenons un tuyau parlant de façon satisfaisante avec un pied relativement fermé ($\varnothing = 3,1$ mm). Les pressions dans la gravure et dans le pied sont respectivement 67 et 21 mm d'eau. Ouvrons grandement l'orifice du pied ($\varnothing = 8$ mm). Il faut alors ramener à 22 mm la pression de la gravure afin que la pression dans le pied soit la même. En écoutant le tuyau et en examinant l'analyse du son au sonographe on constate d'importantes modifications, surtout au moment de l'attaque (fig.37).

fig 37

Pied fermé : Le son de bouche accroche le partiel 5 du tuyau ce qui produit un petit sifflement caractéristique avant le son du tuyau proprement dit. On voit également que le son de bouche comporte une part notable de bruit d'écoulement dû aux tourbillons se formant à l'ouverture étroite du pied, bruit qui persiste dans le son normal du tuyau.

Pied ouvert : A l'oreille, l'attaque du tuyau est franche et nette. On voit sur le sonogramme un petit trait vertical : c'est une bande de bruit de quelques 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 sans doute d'interactions entre les partiels du pied et ceux de la gravure.

En effet, la vibration périodique produite au niveau de la lumière se communique à l'air contenu dans le pied et par suite à celui de la gravure lorsque l'ouverture du pied est suffisante (bib. BOUASSE (3) T.I. p.229). A son tour, l'air de la gravure est susceptible de réagir sur le son de bouche et même sur la composition harmonique du tuyau. On sait bien que le son d'un tuyau donné change selon la place qu'il occupe sur la gravure, et ceci indépendamment de la réaction des tuyaux environnants. Ces phénomènes posent de difficiles problèmes à l'harmoniste et sont sans doute une des raisons qui ont conduit à l'abandon du " plein vent " par un certain nombre de facteurs.

Lorsque l'agrandissement de l'ouverture du pied ne modifie plus la sonorité on est en " plein vent ". Pratiquement (o) et (S) ont alors *à peu près* la même surface.

Que l'on harmonise à pied ouvert ou à pied fermé, chacune des deux méthodes présente des avantages et des inconvénients.

En plein vent :

...../

- la pression nécessaire est plus faible (moins de dépense d'énergie).
- l'harmonisation est 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, la pression dans le sommier étant plus faible, les moindres fluctuations de pression sont perceptibles se traduisant par une légère instabilité en fréquence, qui, bien dosée, donne de la vie au son.

Remarque : La pression utilisée dans cette expérience ne serait pas praticable dans un orgue harmonisé en plein vent où il faut au moins 40 à 50 mm d'eau pour assurer un bon fonctionnement sur toute l'étendue de l'instrument.

§ 2.35 - Longueur du pied et formation du jet

Dans une flûte à bec l'air est conduit à la lumière par un " canal " parallépipédique convergent de 3 à 4 cm de long. Pour des raisons pratiques il n'est pas possible d'adopter les mêmes dispositions dans un tuyau d'orgue en métal. On obtient cependant un résultat identique en réalisant un conduit conique de longueur suffisante, comme le montre l'expérience suivante.

Expérience : Un tuyau de taille moyenne, sonnante LA3 (440 Hz) possède un pied de 200 mm. On enregistre le tuyau normal et le son de bouche isolé puis on répète les mêmes opérations en réduisant le pied à 72 mm puis à 15 mm. Dans chaque cas 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. On peut voir les résultats de l'analyse sur la figure 38.

En (a) pour la longueur normale (200 mm) le son de bouche possède de nombreuses composantes dont la plus intense, située vers 2000 Hz accroche le partiel 5 du tuyau. Celui-ci est riche en harmoniques et a une attaque franche.

En (b) avec un pied de 72 mm, le son de bouche se réduit à trois composantes et renferme beaucoup de bruit. On retrouve ce bruit dans le son du tuyau dont le son s'est appauvri. On notera que le partiel d'attaque (P5) dû à la deuxième composante du son de bouche ne s'est pas modifié; il est plutôt renforcé.

En (c) avec le pied réduit à 15 mm le son de bouche n'est plus qu'une bande de bruit coloré dans la région de 2000 Hz. Le tuyau souffle péniblement et ne fournit

plus que les deux premiers harmoniques.

Remarque - A propos des deux expériences précédentes on a pu voir que 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. Ils sont indiqués sur les figures 38 a et b, à droite du son de bouche. 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 les figures 38a et 38b. Précisons que le temps d'accommodation diminue avec le raccourcissement du pied soit que le phénomène est lié à une onde dont le temps de propagation diminue avec la longueur du pied, soit que le caractère plus bruyant du son de bouche permette d'autant mieux l'accommodation.

Lors du jeu normal du tuyau, le régime buccal est déjà terminé avant que ne se produise l'accommodation. Les partiels du pied ne jouent sans doute pas un rôle important sauf dans le cas où une des fréquences du son de bouche coïncide avec un partiel du pied. Cette fréquence se trouvera alors considérablement renforcée en intensité et en stabilité.

En bref, on constate que le pied doit avoir une longueur suffisante pour assurer la formation du son de bouche. A proprement parler les fréquences principales du son de bouche n'ont pas changé. Dans les trois cas on observe une composante principale vers 200 Hz, celle qui accroche le partiel du tuyau. Mais lorsque le pied est réduit à 15 mm le son de bouche n'a plus assez de "cohésion" pour provoquer l'attaque et l'entretien du tuyau. Une visualisation des phénomènes montrerait sans doute la substitution au jet bien formé en a) d'un écoulement tourbillonnaire et instable en c). Tout corps étranger dans le canal d'une flûte à bec provoque un résultat acoustique semblable; c'est en particulier le cas des gouttelettes d'eau qui se déposent par condensation. L'expérience montre qu'il n'y a pas d'inconvénient à allonger le pied, ou plus généralement tout conduit entre le système d'alimentation du tuyau et la lumière; c'est le cas des tuyaux postés, et de la flûte à bec basse munie d'un bocal.

§ 2.36 - Forme de la lumière - les "dents"

La lumière des tuyaux d'orgue a la forme d'un rectangle très allongé où le rapport de la petite à la grande dimension est de l'ordre de 50 dans le médium (Octave 3). C'est en fait une fente très fine dont l'état des arêtes conditionne en grande partie l'aspect du jet qui en sort, donc la composition spectrale du son de biseau. Voici une expérience montrant le rôle des "dents" que certains harmonistes pratiquent à la lumière des tuyaux d'orgue.

...../

Expérience - Lorsqu'on taille la bouche pour faire parler le tuyau les arêtes de la lumière sont vives, tranchantes et le son de bouche correspondant est riche en fréquences aiguës; bien souvent le tuyau grésille. Il est d'usage d'émousser légèrement le plan incliné du fond (fig.39) 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'expérience que nous avons faite, nous avons exagéré les phénomènes afin de les montrer avec plus de netteté.

fig.40 On voit fig. 40 les sonagrammes du son de bouche et du 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 coexistent dans le son normal et produisent des battements avec les harmoniques du tuyau. Le son est riche, mais instable : le tuyau grésille.

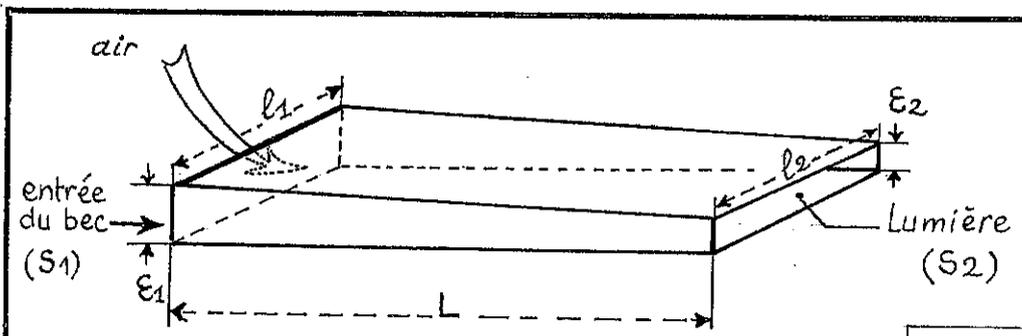
Lorsque la lumière est garnie de dents, le jet d'air s'écoule suivant des vitesses différentes par suite des frottements plus ou moins importants, irréguliers. Il se forme des enroulements parasites, des tourbillons qui s'opposent à la production de fréquences aiguës stables. Dans le son de bouche, ceci 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, à distance, paraît un peu molle. Le fondamental est renforcé en intensité et les harmoniques sont bien stables. En revanche, la perte des harmoniques aiguës et le renforcement du fondamental font que la sonorité du tuyau est sourde, terne. Dans le langage des harmonistes un tel tuyau " a perdu la vie, il est mort..."

Comme pour toutes les opérations d'harmonisation il faut avoir la main légère et selon les cas, savoir émousser l'arête inférieure du fond, juste de la quantité nécessaire. A cet endroit, une altération à peine visible à l'oeil produit déjà des changements de timbre perceptibles. La délicatesse est particulièrement nécessaire pour les tuyaux de 4, 2 et 1 pied (DO 2 à SI4) dont les harmoniques et les bruits d'attaque sont placés dans la zone sensible de l'oreille (500 à 5000 Hz).

Etant donné qu'elle conditionne l'état des arêtes, la texture du matériau du tuyau a donc un rôle déterminant au niveau de la lumière. Selon qu'il s'agit d'un matériau lisse, rugueux, fibreux, granuleux, le résultat sonore sera différent, toutes choses égales par ailleurs.

Quand au rôle de la forme proprement dite de la lumière nous en sommes réduits aux hypothèses. L'expérimentation en ce domaine est d'une très grande difficulté. Que ce soit en modifiant une bouche donnée ou en construisant des bouches similaires il es

41



Dimensions (en mm) d'une flûte à bec alto (Au. 1965)

$$L = 55 \quad \begin{cases} l_1 = 12,5 \\ l_2 = 11 \end{cases} \quad \begin{cases} \epsilon_1 = 2,20 \\ \epsilon_2 = 0,88 \end{cases}$$

$$S_1 = 27,5 \text{ mm}^2 \quad S_2 = 9,7 \text{ mm}^2 \quad \frac{S_2}{S_1} = 0,35$$

Marge de variation constatée sur des flûtes modernes

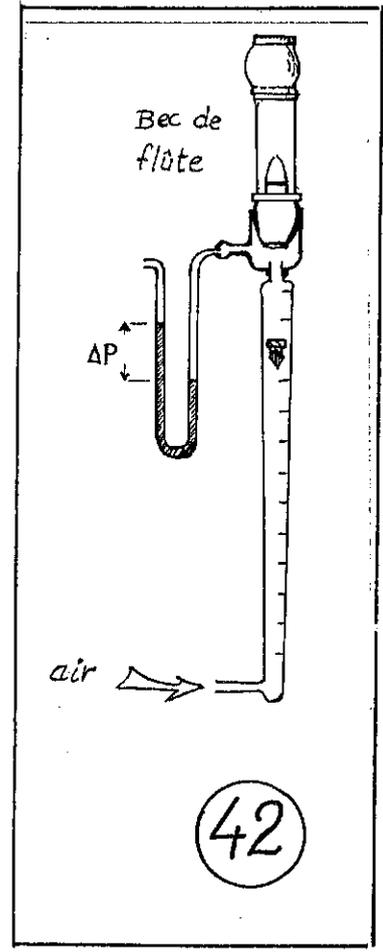
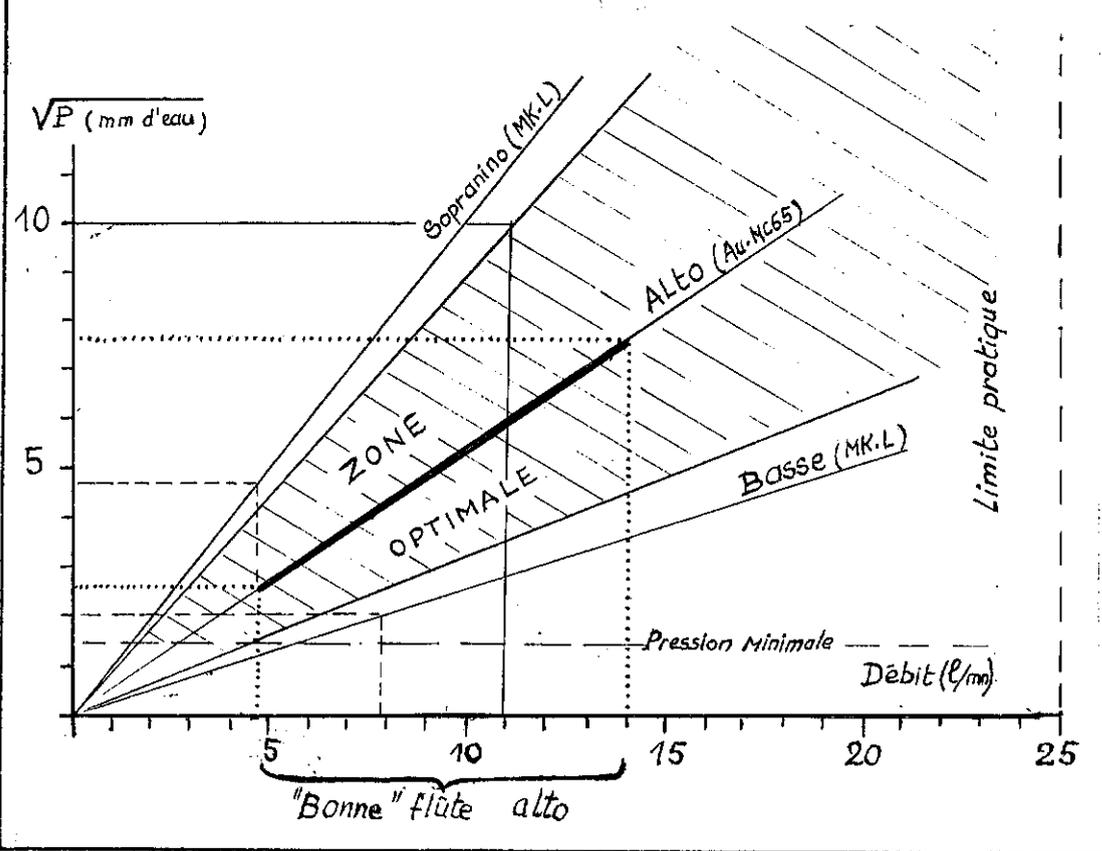
$$1,5 < \epsilon_1 < 3$$

$$0,75 < \epsilon_2 < 1,5$$

$$0,3 < \frac{S_2}{S_1} < 0,6$$

FLUTES A BÉC: courbes Débit / pression

43



42

difficile d'affirmer que l'on reproduit à coup sûr la même direction du jet et que celui-ci a la même position par rapport au biseau. Enfin si l'on veut comparer - à surface égale - une lumière très allongée et une lumière quasi ronde on est conduit à modifier complètement la forme de la bouche (largeur, hauteur) pour obtenir un son correct dans les deux cas.

2) LE BEC DE LA FLÛTE A BEC

§ 2.37 - Description

La partie du bec assurant la formation d'un jet est un conduit convergent : le canal, de section généralement rectangulaire. Les instruments populaires présentent toutefois une assez grande variété de forme et de dimension (Bib. MOECK). Précisons également que lorsque le conduit est très court (10 à 20 mm) on a généralement affaire à un instrument d'un type particulier dont nous reparlerons au paragraphe 2.65.

fig.41 Nous avons pu examiner une trentaine de flûtes à bec baroques de facture moderne, en bois et en plastique. Nous donnons fig.41 les dimensions du conduit relevées sur un instrument particulier ainsi que la marge de variation constatée sur l'ensemble des instruments.

La convergence du canal est obtenue par diminution progressive de ξ dans tous les instruments et quelquefois également par diminution de l ($l_2 < l_1$). Le rapport S_2 / S_1 de la section de sortie à la section d'entrée est compris entre 0,3 et 0,6 pour les instruments examinés.

§ 2.38 - Réglage du débit

On sait que pour un ajutage conique convergent le débit maximum s'obtient pour $S_2 / S_1 = 0,6$ (BOUASSE (1) p. 26) mais en ce qui concerne la flûte à bec d'autres paramètres sont à prendre en considération car pour les instruments de meilleure qualité ce rapport semble avoir une valeur plus faible (0,5 voire 0,4).

De même que pour le tuyau d'orgue le facteur peut régler le débit en agissant sur S_1 ou sur S_2 . L'examen d'un grand nombre de flûtes, de la basse à la sopranino montre que les instruments considérés comme bons ont une lumière dont l'épaisseur ξ est voisine de 0,9 mm. La largeur du canal étant par ailleurs donnée

par la largeur de la bouche, la section S_2 se trouve ainsi déterminée. Le facteur peut augmenter le débit en ouvrant l'entrée du bec; du même coup il modifie aussi le degré de convergence S_2 / S_1 dont le rôle reste à élucider.

§ 2.39 - Mesure du débit (air sec)

Nous avons utilisé un rotamètre étalonné pour le gaz ammoniac (NH_3) dont la densité est 0,586. La poussée exercée sur le flotteur étant en gros proportionnelle à $\frac{1}{\sqrt{P}}$ on a :

$$\frac{\text{débit (air)}}{\text{débit (ammoniac)}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{0,586}}} \quad \text{d'où} \quad \text{débit (air)} = \text{débit (ammoniac)} \times \frac{1}{1,307}$$

fig.42 La figure 42 montre le montage du dispositif de mesure.

fig.43 On constate tout d'abord que le débit croît uniformément avec \sqrt{P} donc avec la vitesse de l'air alimentant la flûte (fig.43). Les points expérimentaux se placent sur un faisceau de droites dont l'origine est voisine de celle des coordonnées. Pour simplifier posons $Q = (1/k)\sqrt{P}$. On voit que k est compris entre 0,2 et 0,9. Lorsqu'on possède le champ de liberté en pression de l'instrument on peut en déduire les valeurs minimales et maximales du débit nécessaire pour l'alimenter sur toute l'étendue.

Compte tenu de la quantité d'air disponible pour la respiration, valeur que l'on peut fixer à 3 litres pour un individu moyen, il faudra, pour jouer une mélodie de 20 secondes sans inspiration, dans le médium de l'instrument que le débit moyen soit de 9 l./mn. Portons sur le graphique les limites d'utilisation en pression d'un instrument type considéré comme agréable à jouer : pour $2,5 < \sqrt{P} < 7,5$ on lit $4,6 < Q < 14$ l./mn ce qui correspond à l'ordre de grandeur prévu.

Une flûte dont le débit est trop grand épuise rapidement le joueur ce qui peut être fort gênant dans les mouvements lents.

Par contre, un débit faible n'est désagréable qu'à basse pression; si la pression est suffisante le musicien ressent une "résistance" avec laquelle il peut composer pour régler son jeu, ce que le musicien traduit par l'expression "s'appuyer sur la colonne d'air". A faible pression les moindres irrégularités de l'alimentation sont perçues comme variations de fréquence et la stabilité devient problématique.

On peut donc définir une zone optimale dans laquelle on trouve d'ailleurs la plupart des instruments.

§ 2.40 - Variation du débit avec les dimensions de l'instrument

La largeur de la bouche étant proportionnée au diamètre de l'instrument les ouvertures S1 et S2 croissent à mesure que l'instrument est plus grave. Pour conserver à l'instrument un débit moyen compatible avec la capacité respiratoire d'un individu quelconque le facteur devra régler les instruments très graves (double basse, contrebasse) de façon qu'ils parlent à basse pression. Cet impératif est en contradiction avec le fait que l'oreille voit sa sensibilité décroître vers les basses fréquences, ce qui suppose que les flûtes basses doivent fournir une intensité physique plus grande pour être entendues à intensité comparable. Cependant il ne faut pas oublier que les instruments graves ne sont généralement pas joués en solistes. Or nous avons observé à plusieurs reprises qu'un tuyau grave de bourdon d'orgue ou qu'une flûte à bec double basse (fondamental FA 1) bien que paraissant de faible intensité lorsqu'on les joue isolément prennent une importance particulière dans un ensemble polyphonique. Le local joue aussi un rôle certain car dans la plupart des cas une flûte grave sonne plus fort de loin que de près.

Le problème se pose également pour l'équilibre des petites flûtes soprano et soprano dont la tessiture (700 à 4000 Hz) est située dans la zone la plus sensible de l'oreille. De dimensions réduites ces instruments ont nécessairement un débit plus faible, mais dans une mesure beaucoup plus faible que l'augmentation de sensibilité de l'oreille. En pratique on ne les emploie que rarement et toujours avec l'intention qu'ils émergent de l'ensemble, ce qu'ils font sans difficulté. Le jeu prolongé de ces instruments fatigue assez rapidement l'oreille des auditeurs et de l'exécutant.

§ 2.41 - Calcul du débit

Etant donné les petites dimensions du conduit d'une flûte à bec, les irrégularités de section, les aspérités dues au matériau il peut sembler illusoire d'utiliser en ce domaine les formules classiques de la mécanique des fluides.

Partant du théorème de Bernoulli on a, pour un gaz :

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = C^{te}$$

P = pression du fluide considéré

ρ = masse volumique

v = vitesse du fluide

g = accélération de la pesanteur

En affectant de l'indice 1 les grandeurs liées à l'entrée du conduit et 2 celles de la sortie on a

$$P_1 + \rho \frac{(v_1)^2}{2} = P_2 + \rho \frac{(v_2)^2}{2}$$

...../

$$\text{soit } \Delta p = p_1 - p_2 = \rho/2 (v_2^2 - v_1^2)$$

Ecrivons l'égalité du débit à l'entrée et à la sortie du conduit (c'est-à-dire qu'on néglige les pertes de charge)

$$Q = S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad \text{d'où } v_2 = \frac{S_1}{S_2} v_1 \quad \text{et } \Delta p = \frac{\rho}{2} v_1^2 \left[\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 - 1 \right]$$

$$\text{on en tire } v_1 = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho \left[\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 - 1 \right]}} \quad \text{et } v_2 = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho \left[1 - \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right]}}$$

Pour la pression de 9 mm d'eau l'expression donne :

$$v_1 \text{ cm/s} = \sqrt{\frac{2 \times 980 \times 0,9}{0,0013 \left[\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 - 1 \right]}} \quad \text{et } \frac{Q_T}{\text{l/mn}} = \frac{S_1}{\text{cm}^2} \times \frac{v_1}{\text{cm/s}} \times \frac{60}{10^3}$$

Le débit Q_T ainsi calculé pour 29 instruments (alto, soprano et sopranino) est toujours supérieur au débit Q_M mesuré. Pour 25 d'entre eux on a en moyenne $\frac{Q_T}{Q_M} = 1,25$. Etant donné les petites dimensions du conduit les pertes de charges dues en particulier à la rugosité des parois, ne peuvent être négligées.

§ 2.42 - Rôle de l'humidité

L'air que nous expirons est saturé d'humidité (Bib. MÜHLE p.34). Il en résulte deux conséquences principales sur le fonctionnement du bec provenant d'une part de l'absorption d'eau par le matériau du bec et d'autre part de la condensation de l'eau sur les parois du conduit.

a) Effets de l'humidité dus à l'absorption de l'eau par le matériau du conduit.

Le cas se présente lorsque l'instrument est en bois. La partie supérieure et les bords latéraux du canal sont creusés dans le bois de l'instrument qui est plus ou moins capable d'absorber l'humidité (érable, ébène, palissandre, bois d'arbre fruitier, buis). Dans la technique semi-industrielle actuelle le bois est imprégné de paraffine pour faciliter les opérations de tournage. Ce procédé amoindrit ses possibilités d'absorption.

La paroi inférieure du canal est réalisée par le bouchon généralement fait en " red cedar " de Virginie, lequel est un genévrier (*Juniperus Virginiana*). C'est

un bois tendre utilisé dans la confection des crayons à mine. Il absorbe facilement l'humidité et se laisse bien comprimer, ce qui diminue les risques d'éclatement du bec.

Les effets dus à l'absorption sont de deux ordres.

En premier lieu le bois gonfle un peu, les fibres de la surface se hérissent plus ou moins et le conduit voit sa section diminuer : on note toujours une baisse du débit. Les mesures faites par MUHLE ont montré une chute du débit de 5 à 6 % pendant les 10 premières minutes de jeu, chute qui se stabilise vers 0 % au bout de 20 mn.

Mais en gonflant, le bois peut provoquer une déformation de la section du canal. Si la paroi inférieure du canal gonfle plus (bouchon) le jet sera dévié vers l'extérieur de l'instrument ce qui peut entraîner des modifications considérables dans le son de la flûte principalement au moment de l'attaque. Insistons sur le fait que des altérations de l'ordre de 2 à 3/100 de mm, pratiquement invisibles à l'œil nu lorsqu'on regarde dans le bec de l'instrument altèrent le son de façon perceptible. On voit l'importance qu'il faut accorder à la façon dont on taille le bouchon dans les fibres du bois.

b) Effets de l'humidité dus à la condensation d'eau dans le conduit.

Ce point est un des plus délicat et des plus ennuyeux pour le joueur de flûte à bec. Il affecte principalement les flûtes de plastique, d'ivoire, de métal, matériaux non absorbants, mais également les flûtes en bois, surtout lorsque celui-ci est imprégné de paraffine. Les problèmes apparaissent surtout dans le registre grave où la vitesse d'écoulement de l'air est faible.

Tantôt l'eau en s'écoulant sur les côtés forme deux gouttières latérales qui, en obstruant partiellement le conduit diminuent de façon importante le débit : la flûte s'étouffe. Tantôt il se forme des gouttelettes de condensation, généralement sur la paroi supérieure, pouvant atteindre 0,5 mm de diamètre, qui en plus de la diminution de débit modifient la géométrie du conduit, gênent la formation du jet, provoquent la diffusion et entraînent toujours une détérioration de la sonorité, (fig. 44 a).

fig.44a

Nous avons enregistré un instrument defectueux de ce point de vue, pour comparer une même formule jouée :

- pendant les premières secondes
- après 2'15 quand les effets de la condensation commencent à apparaître
- au bout de 5'30, l'instrument étant devenu impraticable.

..../

fig.45

Les 3 sonagrammes de la figure 45 apportent beaucoup de renseignements.

Au départ, le son de l'instrument est riche en harmoniques, principalement de rang impair. L'attaque des sons est franche, et souvent accompagnée d'un petit trait vertical (bruit) qui en souligne la netteté.

En b) l'eau a commencé à former des gouttières latérales dans le canal. L'instrument est d'intensité plus faible et les attaques sont déjà moins nettes. Les harmoniques pairs apparaissent dans l'aigu. En c) des gouttes se sont déposées sur les parois supérieures et inférieures. Par comparaison avec a) on voit que le timbre est profondément altéré; il est très irrégulier d'une note à l'autre et d'une fois sur l'autre car les gouttes se déplacent. Noter le bruit de souffle important précédant les notes aiguës (RE5, MI5 et FA5) et les retardant d'autant. L'établissement du fondamental se fait graduellement, ce qu'on reconnaît à la forme en boule sur le sonagramme.

En soufflant vigoureusement dans le bec on retrouve un son convenable, mais à peine 30 secondes plus tard la flûte est de nouveau bouchée.

L'observation attentive du conduit de différentes flûtes en bois nous a permis de faire quelques remarques concernant les rapports entre la géométrie de la lumière et la tendance à l'obstruction.

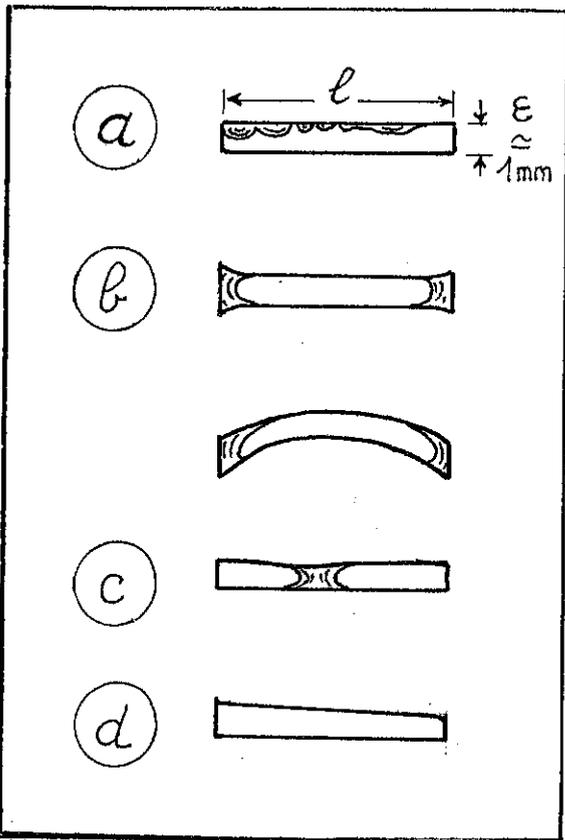
Tout d'abord les instruments dont l'épaisseur de la lumière est supérieure à 1,10 mm environ ne se bouchent pas. Mais sachant que l'optimum se situe vers 0,9 mm il n'est pas souhaitable d'adopter une dimension aussi grande.

fig.44
b,c,d,

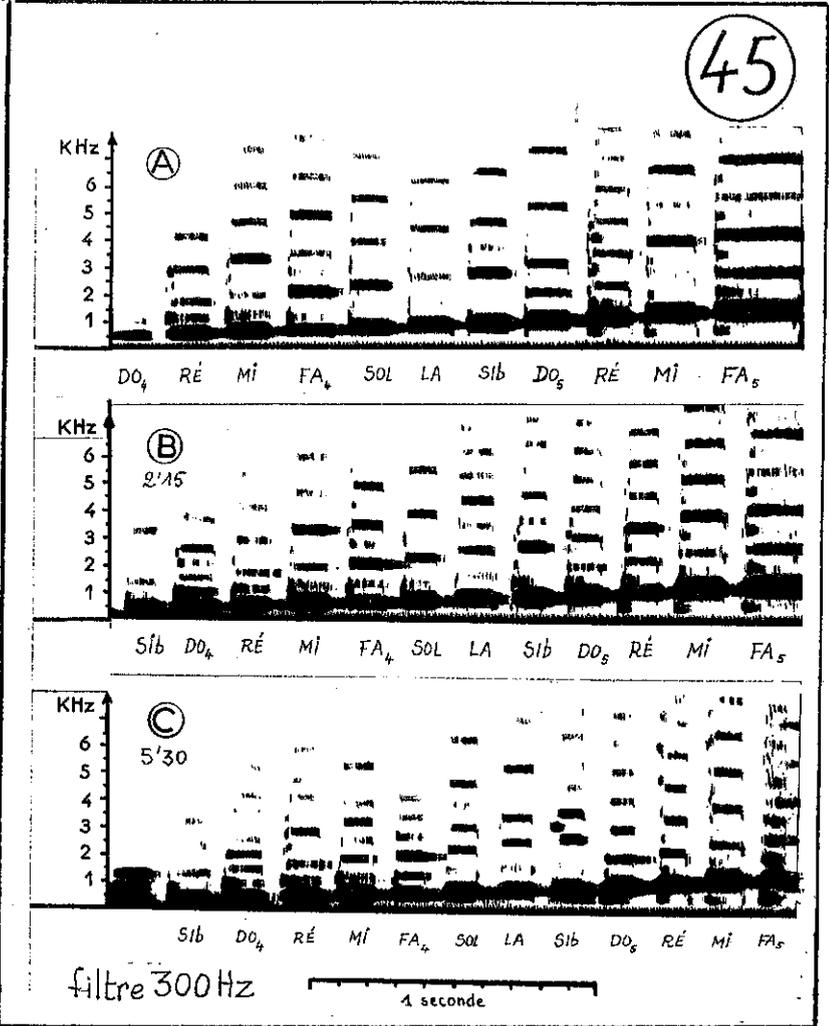
- un bombement vers le bas de la partie supérieure du conduit (fig.44b) ou un élargissement de la section dans les coins du rectangle favorise la formation de gouttières latérales parfois importantes.
- une irrégularité locale située dans la partie médiane (fig. 44c) peut provoquer la formation d'un pont de condensation reliant les parois inférieure et supérieure du conduit ce qui détruit instantanément la sonorité.
- Nous possédons deux instruments dont la lumière, de petites dimensions, est irrégulière : elle va en diminuant d'un bord à l'autre. La différence entre les deux épaisseurs atteint 0,15 mm. Ces instruments ne se bouchent pas (fig. 44d).

Le problème est évidemment compliqué car outre les dimensions absolues de la lumière, sa forme, il faut prendre en compte l'état de surface des parois, l'humidité ambiante, la composition chimique de la salive du joueur pour ne citer que les paramètres les plus importants.

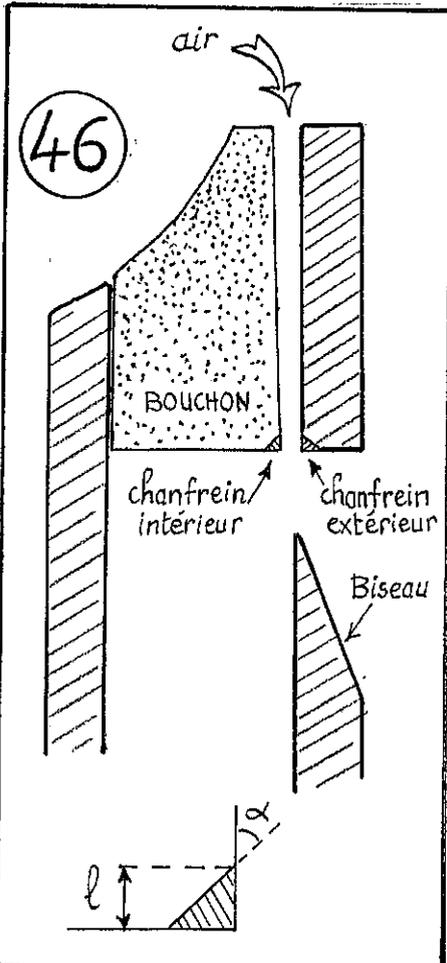
44



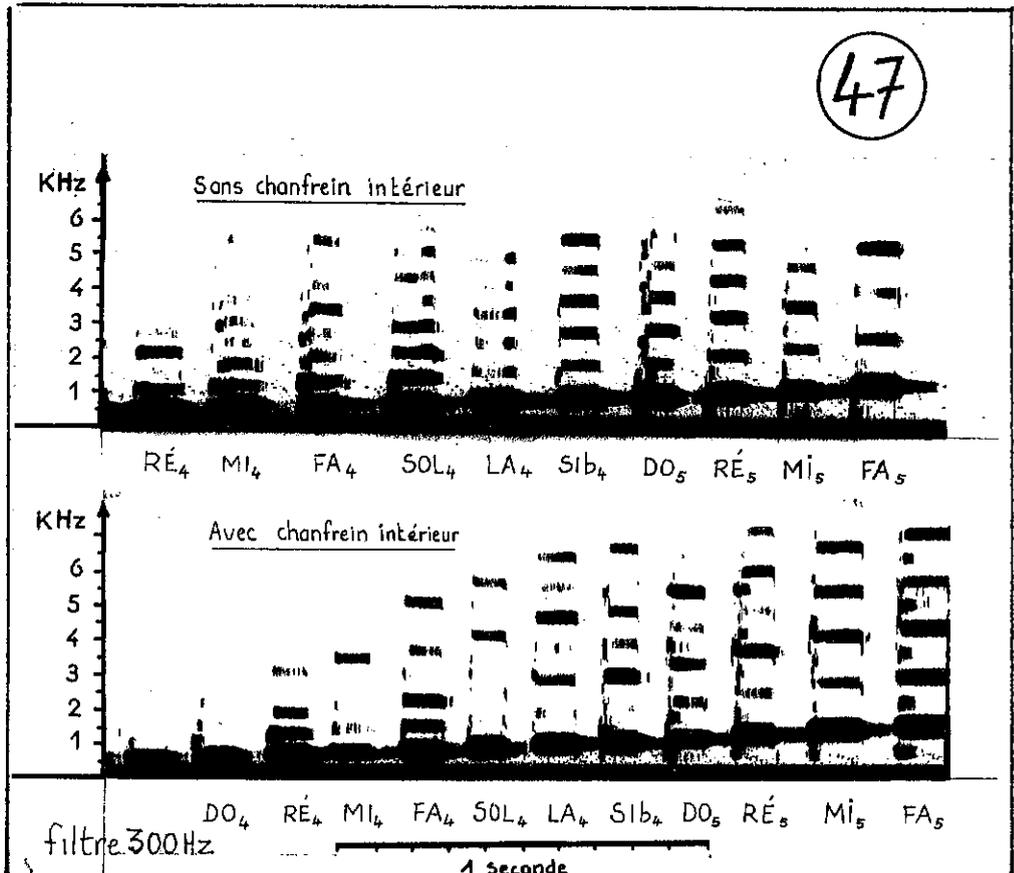
45



46



47



Le rôle de l'humidité est donc particulièrement complexe dans le cas de la flûte à bec et fort difficile à maîtriser. Les facteurs contemporains n'ont semblé-t-il pas résolu ce problème. Le seul palliatif efficace consista à badigeonner périodiquement la partie supérieure du canal avec de l'eau additionnée d'un peu de mouillant, ce qui prévient la formation de gouttes dans le canal.

§ 2.43 - Les chanfreins des bords de la lumière

Il est d'usage de chanfreiner le bord inférieur de la lumière (celui qui est formé par le bouchon) et quelquefois également le bord supérieur. La largeur (ℓ) du chanfrein et son inclinaison (α) varient selon les fabricants. On a couramment $\ell = 1\text{mm}$ et $\alpha = 45^\circ$ (fig.46).

Les chanfreins ont un rôle complexe sur :

- la direction de sortie du jet
- sa diffusion
- le débit

Leur action diffère également selon l'état de surface du matériau (bois ou plastique) dans la mesure où l'état des arêtes dépend de celui-ci.

Un facteur de flûtes nous dit : (bib. MARVIN) :

" L'effet du chanfrein à la partie supérieure de la lumière semble être de produire un son plus clair avec moins de souffle. A la partie inférieure il semble généralement donner plus d'ampleur à la résonance de l'instrument en supprimant les instabilités (burbles) des notes graves, donnant plus de richesse et éventuellement apportant des bruissements et sifflements s'il est trop important. Mais en fait à chaque sorte d'instrument il faut un chanfrein particulier. Certaines flûtes sont plus instables avec un chanfrein inférieur alors que d'autres ont besoin d'en avoir un assez important. Il semble que ce soit un " secret " propre à chaque instrument.... "

Il est difficile effectivement de mettre en évidence le rôle des chanfreins par une expérience simple. Nous pouvons toutefois proposer l'essai suivant sur une flûte donnée.

Une flûte alto dont nous avons réalisé le bouchon possède, avant chanfrein un son riche mais d'attaque peu sûre. L'analyse au sonagramme (fig.47) montre bien le retard d'établissement des notes MI4, FA4 et DO5 (20 à 40 ms). De plus l'instrument parle à basse pression ce qui en limite l'intensité.

Après avoir pratiqué un chanfrein inférieur, volontairement trop important

pour les besoins de l'expérience, on constate que la flûte a gagné en sûreté d'attaque. On peut jouer plus vite et à pression plus forte, mais la comparaison des sonagrammes montre que le timbre de l'instrument s'est considérablement appauvri. L'harmonique 2 est très faible, voire inexistant et d'une façon générale les harmoniques impaires sont prédominantes. Enfin un bruit de souffle assez important est apparu, qui n'est pas visible sur ces analyses.

Par ailleurs nous avons pu constater que les fréquences du son de bouche n'ont pas été modifiées par le chanfrein, mais que le débit avait légèrement augmenté.

En conclusion nous pouvons reprendre ce que nous disions à propos du tuyau d'orgue : toute action au niveau de la lumière, serait-elle imperceptible à l'oeil a des effets complexes car elle modifie simultanément plusieurs paramètres et l'on comprend qu'un facteur emploie le mot de " secret " car ce n'est qu'au terme d'une longue expérience qu'il saura donner aux chanfreins la largeur et l'inclinaison voulues pour obtenir le résultat sonore qu'il désire.

3) L'EMBOUCHURE DE LA FLUTE TRAVERSIERE

§ 2.44 - Description

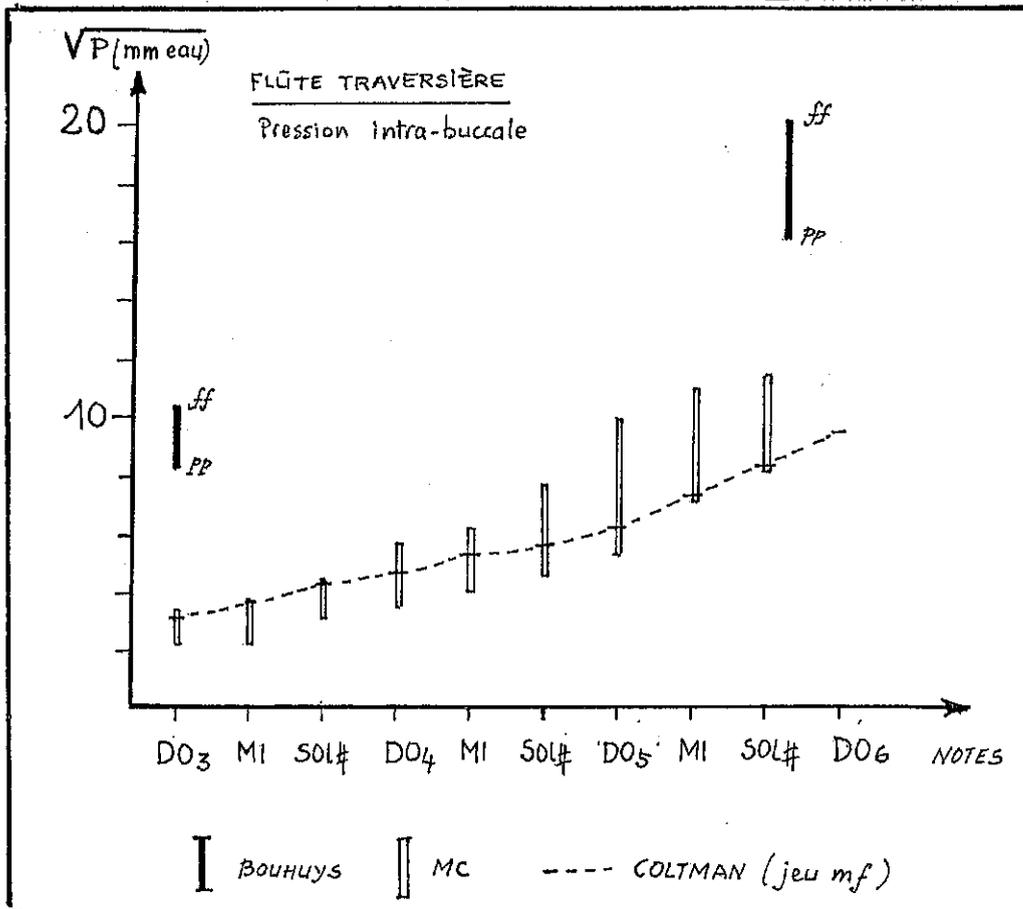
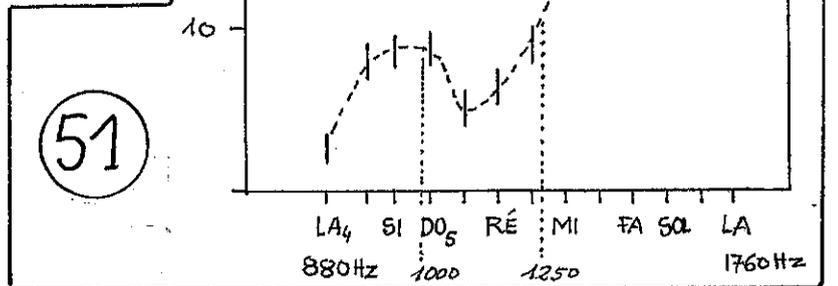
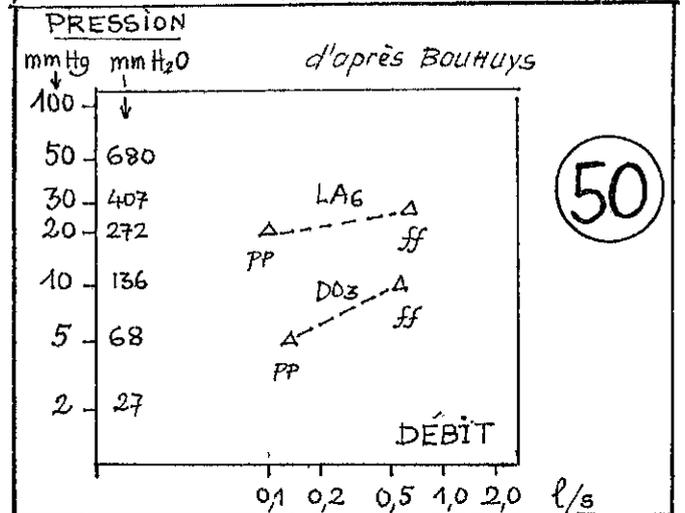
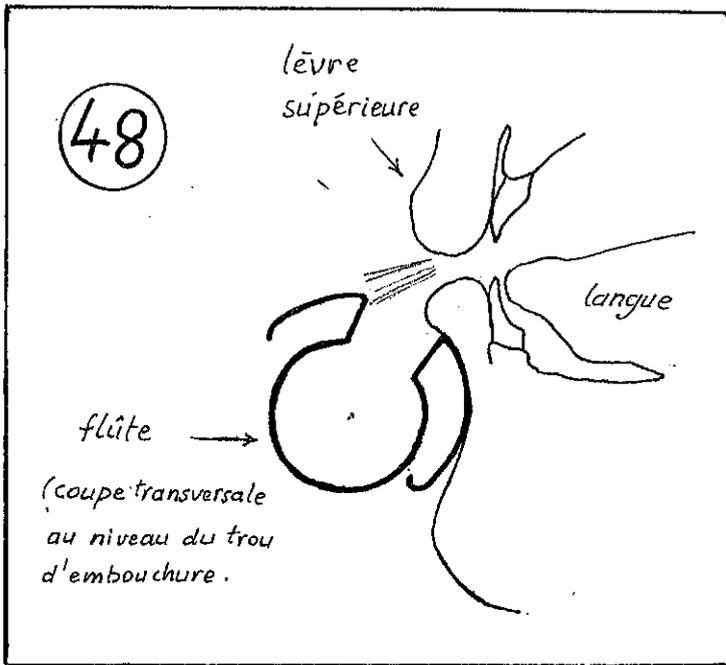
Dans cet instrument le musicien règle simultanément la pression, le débit, la direction du jet, par l'ajustement convenable des muscles du diaphragme, de la langue et des lèvres.

Le conduit précédant la lumière (ouverture des lèvres) a une forme compliquée modifiable en cours de jeu. Il est constitué :

- à sa partie supérieure par le palais dur,
- à sa partie inférieure par la langue,
- les bords latéraux sont formés par les dents et les joues.
- A sa partie antérieure le conduit est prolongé par l'espace laissé entre la pointe de la langue reposant sur la mâchoire inférieure, et les incisives supérieures (fig.48).

fig.48

La lumière proprement dite est formée par l'ouverture des lèvres du flûtiste. Les différentes qualités du jet : forme, rapidité de formation, diffusion, cohésion... dépendent directement de l'anatomie de l'individu (forme, épaisseur et état de surface des lèvres). Notons que ROCKSTRO (§ 7.31) et R. LE ROY (p.55,57) recommandent d'avancer un peu les lèvres afin de former un tube depuis les dents jusqu'à l'exté-



rieur. ROCKSTRO ajoute également que des lèvres minces ne donnent jamais un son intense (§ 727).

§ 2.45 - Contrôle de la pression

En principe la pression de l'air contenu dans les poumons est contrôlée au niveau du diaphragme. Elle croît avec l'augmentation de fréquence car la vitesse de sortie de l'air du jet doit être plus élevée pour les hautes fréquences.

Il est difficile de relever la pression à l'intérieur de la bouche car l'introduction d'un corps étranger (sonde, ballon) gêne le musicien qui, pour retrouver un son convenable doit modifier son embouchure.

BOUHUYS ((2) 1965) place dans la bouche du musicien un petit ballon de latex rempli d'air relié au transducteur de pression par un mince petit tube de polyéthylène. Les valeurs qu'il donne pour 2 notes extrêmes de l'instrument jouées pp puis ff nous semblent curieusement élevées (de 70 à 400 mm d'eau) - (fig. 49).

fig.49

COLTMAN (Bib.(1)) fournit également quelques valeurs relevées sur un musicien jouant mf. Il ne précise pas la technique employée pour mesurer la pression. Ses résultats montrent que la pression moyenne croît de 10 à 90 mm d'eau, du grave à l'aigu de l'instrument (fig. 49).

fig.49

Les résultats que nous avons pu obtenir sur nous-même en introduisant dans la bouche un petit tube de plastique souple (diamètre extérieur : 2 mm) relié au manomètre à eau nous ont donné comme limites extrêmes 5 et 100 mm d'eau, en mf.

La dispersion des résultats selon les auteurs s'explique aisément par le fait que le musicien peut agir sur différents paramètres (pression, débit, orientation du jet) pour obtenir la variation d'une grandeur acoustique (par exemple l'intensité); elle reflète donc les différences de technique. Selon son anatomie et en fonction de ces capacités pulmonaires le musicien pourra jouer à faible ou à basse pression.

§ 2.46 - Contrôle du débit

Etant donné qu'il peut modifier indépendamment l'une de l'autre, la pression intrabuccale et l'ouverture de la lumière (lèvres), le flûtiste est entièrement maître du débit.

En gros l'intensité du son (en dB) croît avec le débit.

L'observation de flûtistes professionnels et l'enseignement des professeurs nous apprennent que l'ouverture des lèvres est plus importante dans le grave que dans

l'aigu. (ROCKSTRO § 753). Ce fait s'explique aisément.

D'une part, la pression dans la bouche croît avec l'augmentation de fréquence. Pour compenser l'augmentation de débit qu'elle entraîne, le musicien expérimenté diminue corrélativement l'ouverture des lèvres afin de conserver à la consommation d'air une valeur moyenne compatible avec ses réserves pulmonaires.

BOUHUYS a mesuré pour deux notes Do3 et La6, l'une grave et l'autre aiguë, un débit compris entre 0,1 et 0,6 l/s qui croît avec l'intensité (fig.50).

D'autre part la sensibilité de l'oreille croît énormément entre 300 et 2000 Hz disons 20 dB pour fixer les idées, soit un facteur 100 si on ne s'en tient qu'au fondamental. L'augmentation de débit parallèle à l'augmentation de fréquence irait donc dans le même sens et déséquilibrerait l'instrument comme c'est le cas pour la flûte à bec.

A titre d'indication ROCKSTRO dit qu'un bon instrumentiste peut tenir le Si3 pendant 30 secondes.

§ 2.47 - Forme de la lumière; bords de la lumière

En principe le flûtiste contrôle entièrement la forme de la lumière. En fait il se fixe assez rapidement dans certaines attitudes et les fluctuations qui se produisent ne sont pas toujours volontaires.

Chez la plupart des instrumentistes la lumière a la forme d'une amande plus ou moins régulière, fortement aplatie sur les bords.

L'état des bords de la lumière dépend directement des particularités anatomiques de l'individu. Selon qu'il a les lèvres minces ou épaisses, lisses, humides ou sèches, rugueuses, on conçoit que le jet aura des propriétés différentes et que la sonorité du musicien sera différente. L'état de surface des lèvres peut d'ailleurs varier selon le moment de la journée pour un individu donné. ROCKSTRO (§ 727) désigne la rugosité incurable des lèvres comme étant un obstacle pratiquement insurmontable au jeu de la flûte traversière. Il recommande également (§ 737) de maintenir humide la portion de lèvres sur laquelle passe l'air.

§ 2.48 - Rôle de la cavité buccale de l'instrumentiste

Par analogie avec le rôle du pied dans le tuyau d'orgue on peut se demander si la forme et le volume de la cavité buccale du musicien ont une action sur la sonorité.

L'expérience est difficile à faire même avec un flûtiste professionnel, car, d'une part seule la radiographie peut nous renseigner - d'ailleurs imparfaitement - sur la forme de la cavité buccale, et d'autre part il est pratiquement impossible d'affirmer que tous les paramètres de l'excitation sont restés sans changement pendant l'expérience.

BENADE et FRENCH (1965) calculent une correction qu'ils estiment entre 5 et 10 cents. A leur suite COLTMAN (4) 1973 a entrepris une étude pour mettre éventuellement en évidence une modification de fréquence provenant du couplage entre la cavité buccale et la flûte.

fig.51 Pour relever les fréquences de résonance de la cavité buccale en cours de jeu il applique la capsule d'un microphone piézoélectrique sur la joue du musicien et obtient, après plusieurs essais une courbe, caractéristique d'un flûtiste. L'intensité recueillie par le micro croît avec la fréquence, excepté entre 1100 et 1250 Hz où se produit un " trou " assez marqué (fig.51).

Par une expérimentation complémentaire au moyen d'un dispositif mécanique d'excitation de la flûte traversière, auquel il adapte une " cavité buccale artificielle " de volume variable, il montre que celle-ci modifie considérablement les fréquences de résonance du système (80 Hz de variation à 994 Hz) mais ceci seulement lorsque la flûte est excitée passivement. Dès que le dispositif est alimenté en air comme dans les conditions normales de jeu, l'amortissement de la cavité ($1/Q$) est tellement important que l'effet devient négligeable. Il conclut en constatant une modification de fréquence d'environ 10 cents (2,5 savarts) au voisinage de 1000 Hz, ce qui est réellement faible eu égard aux autres paramètres.

Il n'en reste pas moins qu'un flûtiste peut avoir la sensation de conformer intentionnellement sa cavité buccale. Grâce à un enregistrement cinéradiographique réalisé avec une flûtiste professionnelle nous avons pu constater d'importantes modifications de la position des organes phonatoires pendant le jeu legato, alors qu'en principe la langue ne bouge pas.

Mais il semble que de tels mouvements soient plus liés au contrôle de la pression et de la formation du jet plutôt qu'à une modification de fréquence ou de timbre provenant d'un couplage de la cavité buccale avec l'instrument.

B - LIAISON JET-TUYAU1) POSITIONS RELATIVES DE LA LUMIERE ET DU BISEAU§ 2.49 - Généralités

L'orientation du jet par rapport au biseau joue un rôle important dans la liaison mécanique entre la lame d'air et le tuyau.

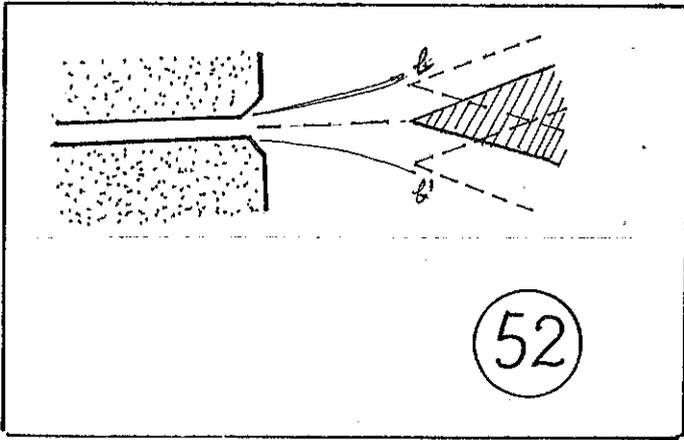
On sait que celle-ci est animée d'un mouvement oscillant de part et d'autre du biseau. Dans le fonctionnement normal du tuyau à bouche, la période de cette oscillation est imposée par l'onde stationnaire créée dans le tuyau, et réciproque^{ment} l'onde stationnaire est entretenue par l'entrée périodique de bouffées gazeuses. Il est donc important que le biseau soit placé de façon optimale sur le trajet de l'air sortant de la lumière. Selon la forme plus ou moins divergente du jet et selon la distance lumière-biseau on disposera, de part et d'autre du plan moyen de sortie du jet, d'une zone bb' plus ou moins étendue, dans laquelle on pourra placer le biseau (ou inversement, déplacer le jet par rapport au biseau) pour obtenir un bon fonctionnement du tuyau à bouche (fig.52).

fig.52

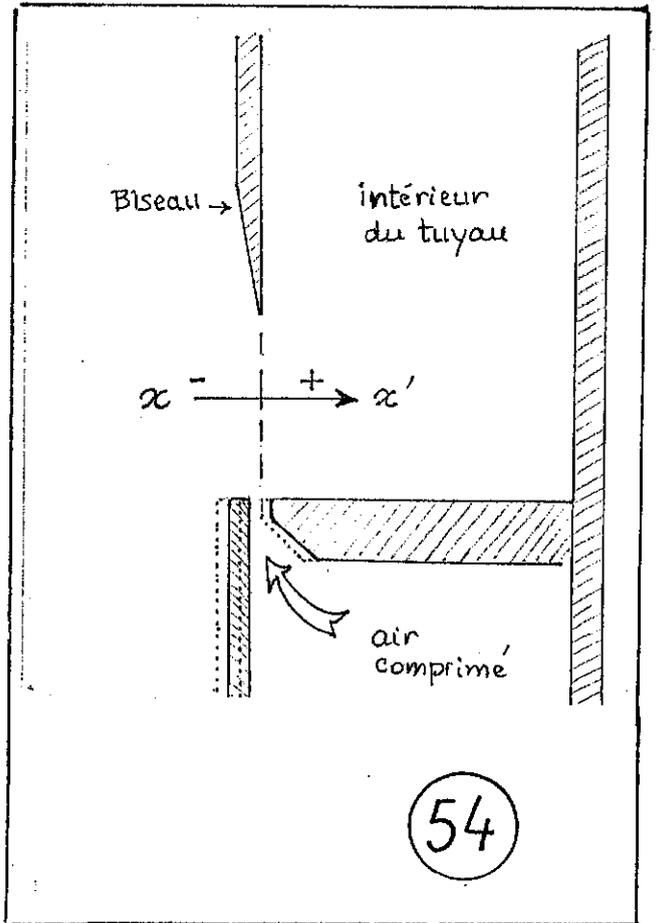
La position relative du jet par rapport au biseau va être décisive à deux points de vue :

- d'une part, la rapidité d'établissement de l'oscillation conditionne la mise en route du tuyau (accrochage); nous en verrons les conséquences sur l'attaque du son à l'aide d'expériences simples.
- d'autre part la forme même de l'oscillation de la lame d'air détermine en grande partie la loi de variation de pression aérienne rayonnée à partir de la bouche donc le timbre de l'instrument. On peut prévoir qu'une disposition fortement dissymétrique (biseau en dehors de l'axe du jet) favorisera l'apparition de nombreux harmoniques au détriment de la sûreté d'attaque. Le réglage optimum d'une bonne bouche est nécessairement un compromis entre ces deux exigences, afin d'obtenir à la fois un timbre riche et une bonne attaque.

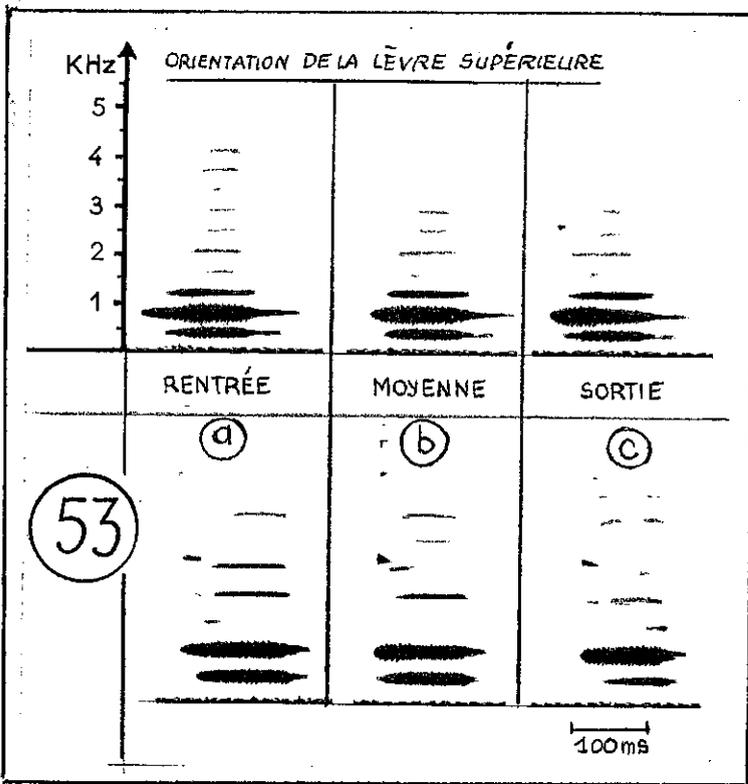
On rencontre dans l'étude de l'orientation du jet une grosse difficulté provenant du fait que le jet n'est pas visible. On suppose le plus souvent qu'il sort dans l'axe de l'ajutage alors que l'état des bords de la lumière peut le faire dévier de façon importante. Quoi qu'il en soit, on doit se contenter ici de repérer, lors



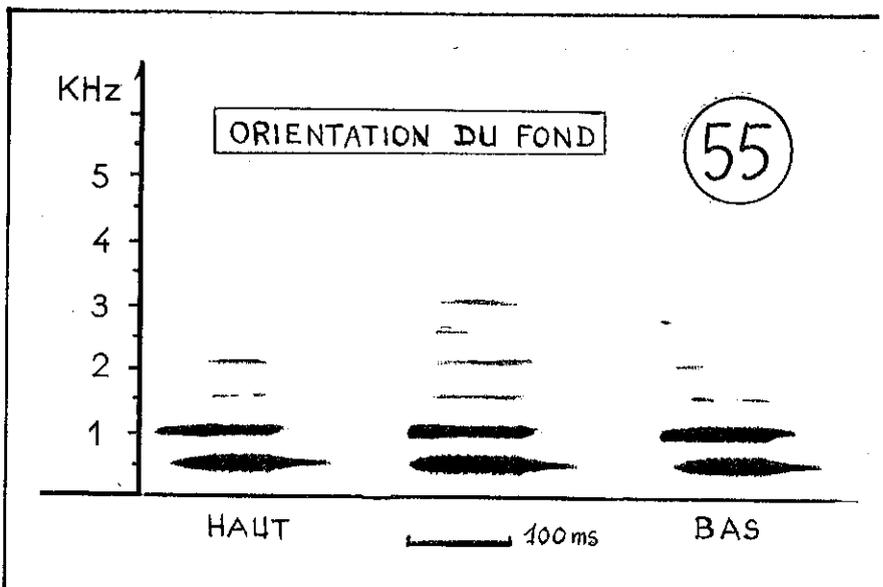
52



54



53



55

des expériences, la position de la lumière par rapport au biseau,

Le réglage de l'orientation du jet par rapport au biseau peut se faire de 2 manières :

- soit en déplaçant le biseau : réglage pratiqué en facture d'orgue lorsqu'on agit sur la lèvres supérieure,
- soit en agissant sur la direction de sortie du jet. Différentes actions sont possibles selon le type d'instrument :
 - modification de la position relative des bords supérieur et inférieur de la lumière,
 - changement d'état des bords de la lumière (chanfrein, dents),
 - utilisation de certains accessoires tels que le rouleau, le frein,
 - modification du profil des parois du canal, juste avant la lumière (flûte à bec).

Toute action sur la lumière est généralement complexe car elle entraîne également des modifications d'autres paramètres associés.

§ 2.50 - Position de la lèvres supérieure. Rôle sur le timbre d'un tuyau d'orgue.

L'opération est simple; elle consiste à avancer plus ou moins la lèvres supérieure à l'aide d'un outil approprié. Quand la lèvres 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, fig.53a le tuyau commence à parler (fig. 53a). Le timbre est riche, mais l'attaque du son dure très longtemps (environ 100 ms); le tuyau est " tardif ". Sortons un peu plus la lèvres supérieure, l'attaque se fait plus franche et plus rapide. Si nous exagérons le mouvement (fig.53c) le tuyau a tendance à octavier.

On peut constater sur la figure que, à l'exception de l'harmonique 2, le contenu harmonique n'a pas changé. C'est principalement la durée de l'attaque qui est affectée. La figure 55 montre l'analyse de 2 tuyaux différents.

§ 2.51 - Déplacement de l'orifice de sortie du jet - modification de la fréquence (tuyau d'orgue)

Sur un tuyau de plexiglas, de section carrée, construit pour les besoins de l'expérimentation, il est possible de déplacer dans le plan horizontal, l'ensemble des pièces réalisant l'orifice de la lumière. Le jet sortant verticalement on peut

...../

fig.54

donc le translater de part et d'autre du biseau, dans le sens xx' indiqué sur la figure (54). La construction du tuyau n'étant pas d'une très grande précision (la fente de la lumière n'est pas tout à fait parallèle à l'arête du biseau) il est inutile de vouloir donner un résultat précis.

Au cours des essais nous avons obtenu le résultat suivant. D'une position extrême à l'autre, entre le moment où le tuyau commence à parler (jet trop extérieur) et celui où il se tait (jet trop intérieur) la fréquence monte d'environ 5 savarts.

Lors d'une expérience similaire Z. CARRIERE ((1) 1925) indique également une modification de fréquence, mais, malheureusement le texte de son article ne permet pas de conclure dans quel sens elle se produit.

Sur le plan pratique la modification de timbre est évidemment beaucoup plus considérable; c'est le phénomène essentiel.

§ 2.52 - Modification de l'orientation du fond (tuyau d'orgue)

Reprenons un tuyau en étain de taille moyenne donnant le D04. Le fond est soudé au tuyau sur sa circonférence, mais l'étain étant malléable autorise de petites déformations. En tapant légèrement et bien régulièrement sur tout le pourtour du fond on peut le faire monter ou descendre selon le côté sur lequel on agit. Il faut faire très attention de ne pas toucher à la lumière. L'action sur le fond est complexe puisqu'on agit à la fois sur la direction de sortie du jet, sur la quantité d'air qui entre dans le tuyau et sur la forme de la lumière.

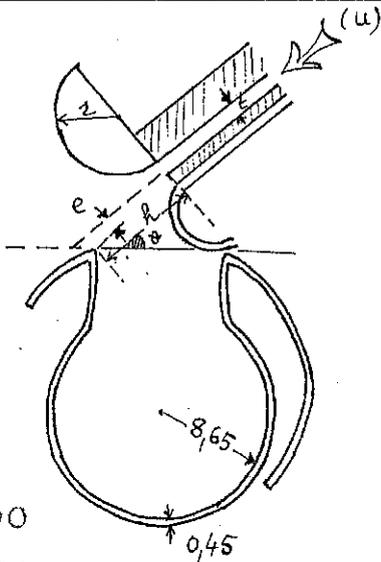
fig.55

La figure 55 montre l'analyse du tuyau pour trois positions du fond : haut, moyen et bas.

Quand le fond est haut, le jet d'air est dirigé vers l'extérieur du tuyau : le tuyau ne parle pas ou est tardif. Inversement pour le fond trop bas, le jet entre trop dans le tuyau; la liaison se fait mal. Sur le sonagramme on voit que le tuyau a tendance à octavier. Par comparaison avec le son de départ du tuyau (position moyen) on constate que le timbre s'est appauvri considérablement dès que l'on a touché au fond pour le monter ou le descendre.

§ 2.53 - Orientation du jet (flûte traversière)

Les instrumentistes et les pédagogues s'accordent généralement pour dire qu'il faut régler la direction du jet d'air en cours de jeu (ROCKSTRO § 734, LE ROY p. 55 à 57). Pourtant ce paramètre n'est pas mentionné par les auteurs modernes ayant

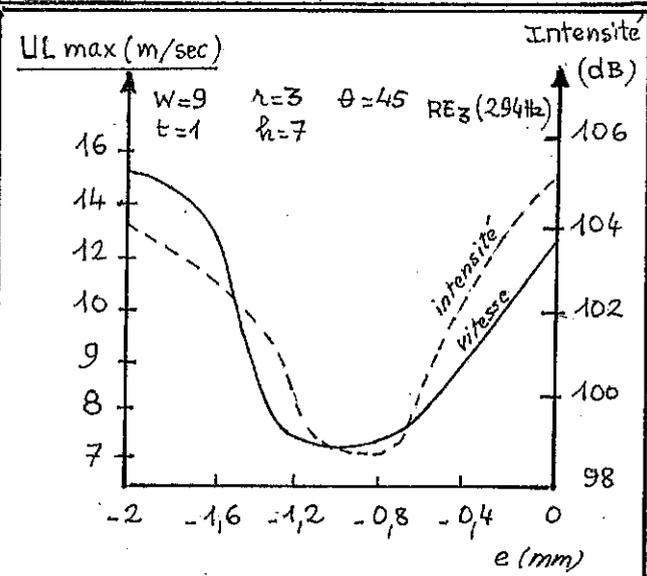


- h = Distance lumière biseau
- θ = angle du jet avec le plan de l'embouchure
- e = distance latérale de l'axe du jet au plan du biseau (0 sur le biseau; positif vers l'extérieur)
- u = vitesse de l'air du jet (m/s)
- t = épaisseur de la lame d'air
- r = rayon de la lèvre supérieure
- w = largeur du jet

56

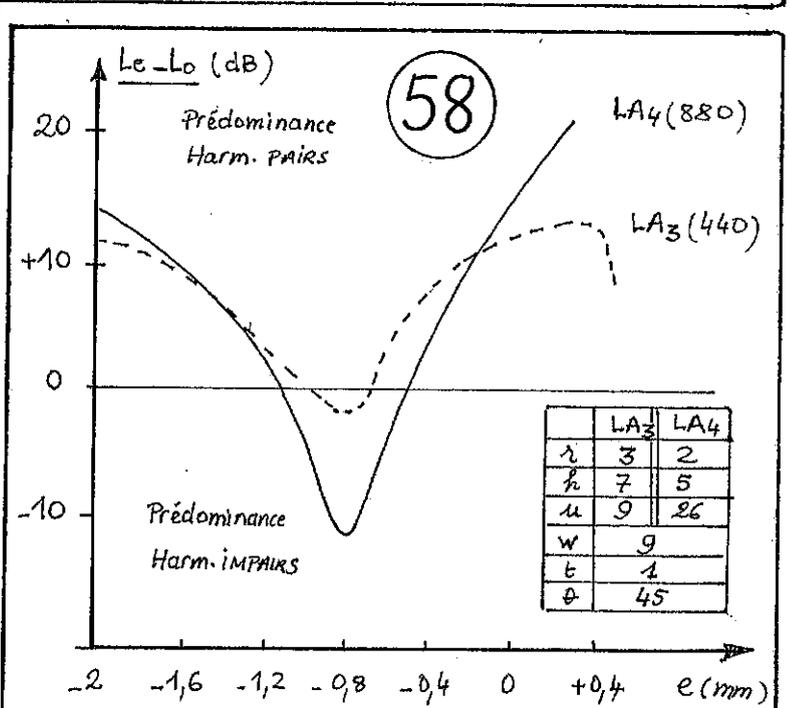
[ANDO - Revue technique du NKH 1966]

J. ANDO



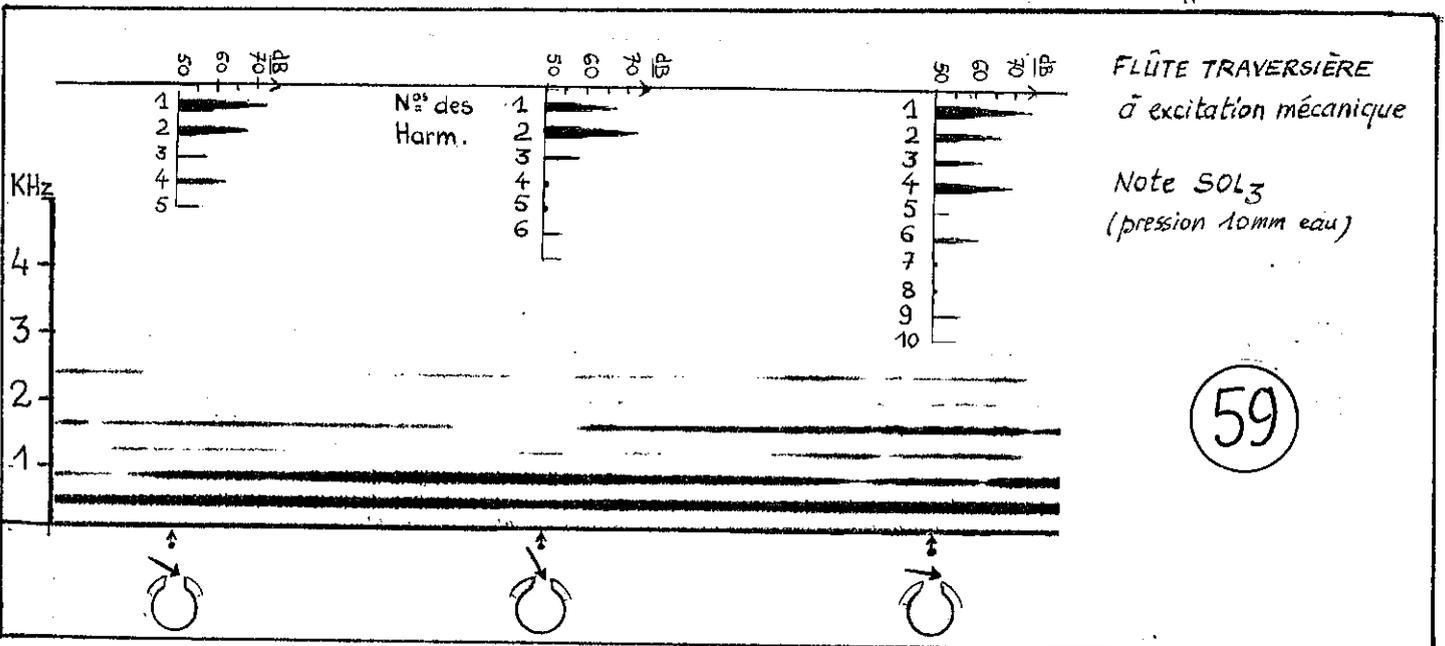
57

d'après J. ANDO



58

d'après J. ANDO



FLÛTE TRAVERSIÈRE
à excitation mécanique

Note SOL₃
(pression 10mm eau)

59

étudié l'embouchure de flûte traversière (BENADE, COLTMAN, NEDERVEEN, KRÜGER) à l'exception de Y. ANDO (3) 1968 qui a travaillé à l'aide d'un dispositif mécanique élaboré permettant d'exciter la flûte artificiellement.

- Expérience 1 (ANDO)

fig.56

Le système d'excitation mécanique de la flûte traversière construit par Y. ANDO permet de régler indépendamment des autres paramètres l'angle (θ) que fait la direction moyenne du jet avec l'arête du biseau, et la déviation latérale du plan du biseau par rapport à l'axe du jet (e) appelée " excentricité " par l'auteur (voir fig. 56). ANDO étudie l'effet de ces deux paramètres sur la fréquence, l'intensité (en dB) et la structure harmonique de 3 sons stationnaires.

Les variations de fréquence dépendant de θ et de e sont négligeables (respectivement 0,2 % pour 10° et 0,2 à 0,6 % par mm). Par contre on constate d'importantes modifications de l'intensité ainsi que du contenu spectral principalement avec e , donc avec la translation du jet.

fig.57

Nous reproduisons fig.57 les résultats de l'auteur. UL max. est la limite supérieure de la vitesse de l'air à la lumière avant le saut au partiel 2. Elle est assez critique pour les sons graves de l'instrument où l'on obtient difficilement une intensité suffisante sans craindre d'octavier. Pour la note RE3 (294 Hz) cette grandeur varie de façon importante avec (e) en passant par un minimum pour (e) voisin de (-1mm). L'intensité mesurée à l'embouchure présente une variation tout à fait semblable.

Le mouvement de translation latérale du jet par rapport au plan du biseau permet donc, dans les conditions de l'expérience décrite de déplacer la limite supérieure du champ de liberté en pression d'une note donnée.

fig 58

Le deuxième graphique (fig.58) rend compte de l'effet de (e) sur le contenu spectral du son. Pour qualifier celui-ci de façon simple, ANDO exprime en dB la différence $Le-Lo$ de l'intensité des harmoniques pairs (Le) et impairs (Lo). Pour LA3 on a $Le-Lo = 1/3 (L2 + L4 + L6) - 1/3 (L3 + L5 + L7)$ où Li est l'intensité du i ème harmonique considéré. Pour LA4 on a plus simplement $Le-Lo = L2 - L3$.

La quantité $Le-Lo$ passe par un minimum lorsque $e = -0,8$ et croît symétriquement de part et d'autre de cette valeur. On a donc pour cette expérience une prédominance des harmoniques impairs lorsque le jet est dirigé près (≈ 1 mm) du bord intérieur du tuyau. Bien qu'il ne s'agisse pas des mêmes notes on peut faire le rapprochement avec le graphique précédent où pour la même valeur de (e) on passait par un minimum d'intensité.

Cette valeur critique (e_0) de e dépend évidemment des autres paramètres de l'excitation.

En conclusion on retiendra que la direction moyenne du jet par rapport au biseau peut avoir une influence importante sur la stabilité en pression d'un régime donné (donc également l'intensité) et sur le contenu harmonique du son. Enfin les variations constatées sont très notables pour de faibles déviations du jet. Ces résultats semblent justifier l'importance qu'accordent les instrumentistes au réglage de l'orientation du jet, d'autant que ce réglage semble très critique. Il explique la grande instabilité des ^{débutants sur la flûte traversière} ~~commençants~~, quand à la qualité du son, puisque les mouvements de la mâchoire, des lèvres, nécessaires au réglage de la fréquence et de l'intensité tendent à tout instant à faire dévier le jet. Ce n'est donc qu'après un long apprentissage qu'un exécutant peut acquérir l'indépendance musculaire nécessaire à la réalisation d'une émission d'abord parfaitement sûre, puis modifiable à son gré.

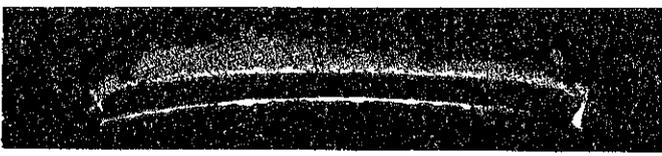
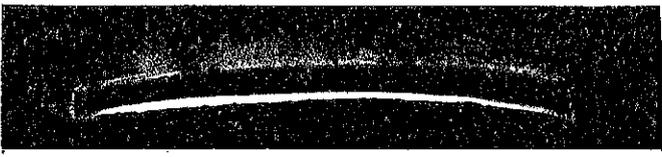
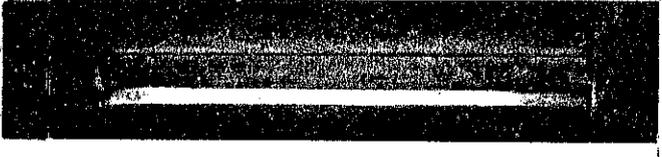
- Expérience 2 (MC)

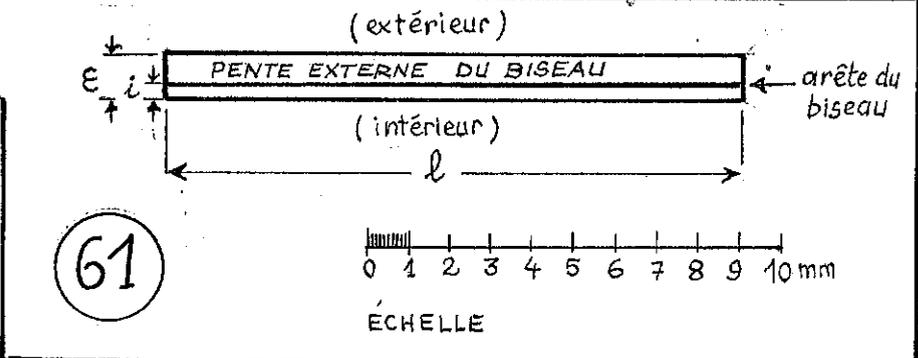
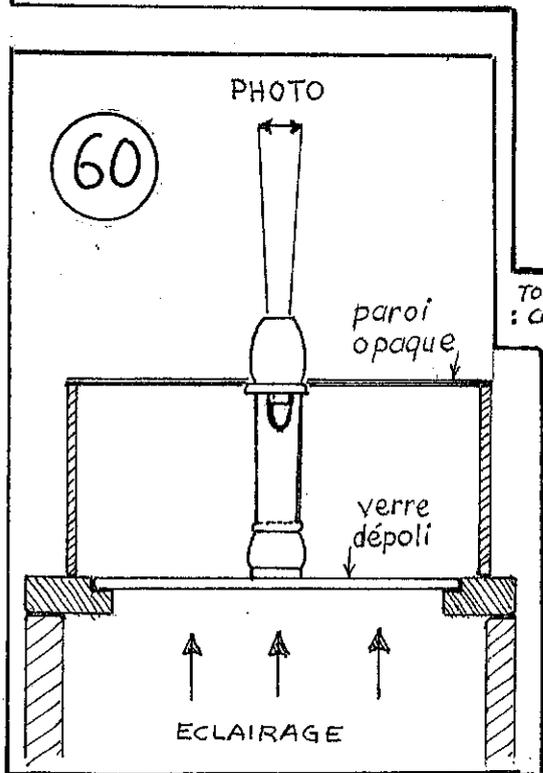
A l'appui des modifications de timbre entraînées par le changement d'orientation du jet nous pouvons proposer l'expérience sommaire que voici. Réglons le dispositif mécanique d'excitation de la flûte de façon à obtenir pour le SOL 3 une intensité et un timbre satisfaisants puis faisons pivoter l'ajutage de façon à dévier le jet de l'intérieur vers l'extérieur du tuyau. (Le mouvement entraîne une modification simultanée de e et de φ). L'analyse au sonagramme montre (fig.59) d'importants changements dans l'intensité des harmoniques. On a représenté également au-dessus du sonagramme les spectres en dB/Hz pris à 3 endroits. L'expérience est intéressante pour montrer dans quel sens se produisent les variations et de plus elle nous apprend que la déviation du jet vers l'intérieur tend à appauvrir le son alors que vers l'extérieur on voit apparaître un grand nombre d'harmoniques de tous rangs.

§ 2.54 - Réglage de la position de la lumière par rapport au biseau (Photos de flûtes à bec).

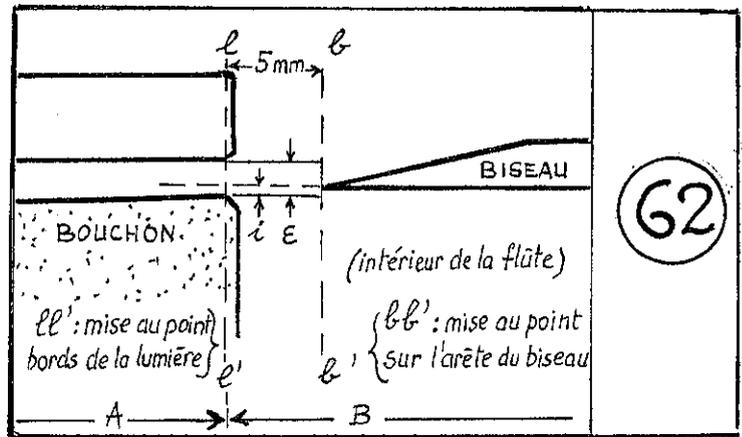
Lors de la construction d'un instrument le facteur règle avec soin la position de la lumière par rapport au biseau.

En regardant par l'orifice d'entrée du canal on peut voir comment se place le bord du biseau dans le rectangle de la lumière. (Il faut tenir l'instrument bien droit et regarder dans l'axe). On peut constater ainsi d'importantes différences selon les fabricants et pour un même fabricant selon les modèles proposés. (On peut d'ailleurs établir un lien assez direct entre ce réglage et le prix de l'instrument.

<p>1) MK pl. lumière = 0 à 20/100 mm $\epsilon = 80/100$ $l = 11,8$ mm</p>	
<p>2) MKéb. lumière $\approx 20/100$ $\epsilon = 75/100$ $l = 12$ mm</p>	
<p>3) MK pr. lumière = 20 à 40/100 $\epsilon = 87/100$ $l = 11,8$ mm</p>	
<p>4) MKér. lumière $\approx 40/100$ $\epsilon = 115/100$ $l = 11,8$ mm</p>	
<p>5) MKer.s. lumière = 50/100 $\epsilon = 130/100$ $l = 13,5$ mm</p>	



Tous les instruments sont placés de la même façon par rapport à l'objectif : centre du viseur au milieu de la lumière.



Il est important de rappeler une fois de plus que l'image vue depuis l'entrée du bec ne correspond pas forcément aux positions réelles du jet par rapport au biseau puisque la direction de sortie de celui-ci dépend de la forme du canal juste avant la lumière ainsi que des chanfreins (largeur, inclinaison).

Quoi qu'il en soit il est intéressant de comparer des photos relevées sur des instruments du commerce, qui donnent une idée de la marge de variation constatée sur des flûtes altos (fig. 60 et 61).

fig.60
et 61

Le rectangle de la lumière (plat ou curviligne) est partagé en deux zones par l'arête du biseau. La partie claire de largeur (i) correspond à l'intérieur de l'instrument éclairé par dessous. La partie sombre est la face extérieure du biseau.

D'une façon générale (i) est inférieur à $\varepsilon/2$ (ε étant l'épaisseur de la lumière). Pour les instruments présentés ici on a $1/8 \varepsilon < i < 2/5 \varepsilon$. Tous ces instruments sont du même fabricant. Les 3 premiers instruments, de même facture et comparables du point de vue de la forme et des dimensions de la lumière montrent d'importantes différences quant à la position du biseau, différences qui peuvent correspondre aux particularités sonores que l'on constate en les jouant. Mais seule une expérience systématique faite avec un instrument réglable peut permettre d'établir des relations entre la position du biseau et le timbre de l'instrument.

§ 2.55 - Expérience - Rôle de la translation du jet par rapport au biseau, sur le timbre d'une flûte à bec.

fig.62 Nous avons utilisé une flûte à bec du commerce en matière synthétique dont on peut ôter le bouchon, et que nous avons coupée dans le plan ll' (fig.62) perpendiculaire à l'axe de l'instrument et passant par la lumière. Après avoir rétabli les chanfreins et réalisé un dispositif de serrage, l'instrument est de nouveau jouable. En faisant glisser l'une sur l'autre les deux parties A et B dans le sens avant arrière, il est possible de diriger le jet à volonté vers l'extérieur ou vers l'intérieur de l'instrument.

Comme repère nous utiliserons l'image de la lumière vue depuis l'entrée du bec.

A chaque réglage nous prenons tout d'abord une photo de la lumière puis nous jouons sur l'instrument diverses formules permettant de tester l'intensité, la rapidité d'attaque, l'homogénéité du son. Il faut très fréquemment essayer les parois du canal et les bords de la lumière pour éliminer les gouttes de condensation qui modifieraient complètement les résultats.

fig.63 Lors d'un premier essai nous avons volontairement adopté des positions extrêmes. On peut comparer (fig.63) les sonagrammes d'une gamme diatonique jouée en legato sur toute l'étendue de l'instrument pour 3 réglages différents : jet très extérieur, moyen et très intérieur. L'analyse a été faite avec un filtre large ($\Delta f = 300$ Hz) afin de mieux faire apparaître les différences d'intensité des harmoniques. Pour chaque réglage nous avons reproduit en haut et à gauche du sonagramme l'image photographique de la lumière.

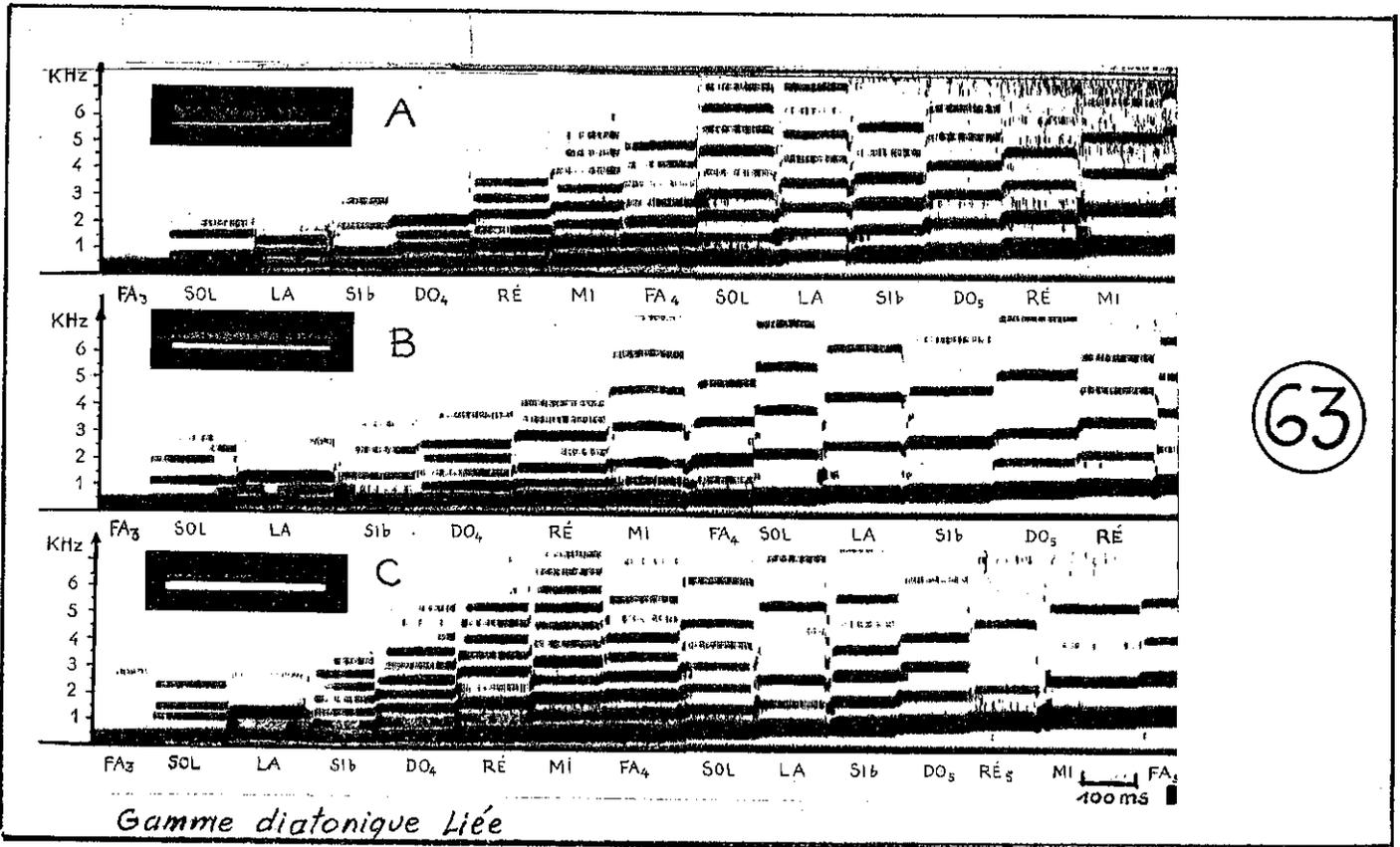
Quel que soit le réglage, on peut remarquer que l'instrument n'est pas homogène du point de vue du timbre; il existe d'assez importantes différences de spectre d'une note à l'autre : ex. SOL3, LA3 et Sib3. Le fondamental, présent à chaque note est de loin l'harmonique le plus intense. Le réglage de l'intensité n'ayant pas été modifié au cours de l'enregistrement les premières notes graves n'apparaissent que faiblement.

Malgré les différences on peut noter d'importants changements statistiques dans le spectre, attribuables au réglage de la position du jet par rapport au biseau.

- Jet très extérieur (A). Le son de l'instrument est riche en harmoniques de tous rangs. Noter la présence de l'harmonique 2 (excepté le FA grave) sur toute l'étendue. Les notes de la deuxième octave sortent aisément, avec intensité, mais accompagnées d'un bruit de souffle d'autant plus important que l'on monte dans l'aigu (bien visible sur le sonagramme).
- Jet médian (B). On remarque une prédominance très nette des harmoniques impairs qui peut aller jusqu'à l'exclusion totale des pairs voir : SOL4, LA4 et Sib4. L'instrument est mieux équilibré du point de vue de l'intensité.
- Jet très intérieur (C). Dans l'ensemble le timbre tend à se rapprocher de celui que l'on obtenait avec le premier réglage, avec des harmoniques de tous rangs mais il faut bien remarquer la faiblesse de l'harmonique 2 et surtout l'hétérogénéité du résultat sonore. Voir en particulier les notes de FA4 à RE5.

Enfin l'aigu sort avec difficulté alors que le médium est au contraire favorisé. La balance de l'instrument s'est modifiée.

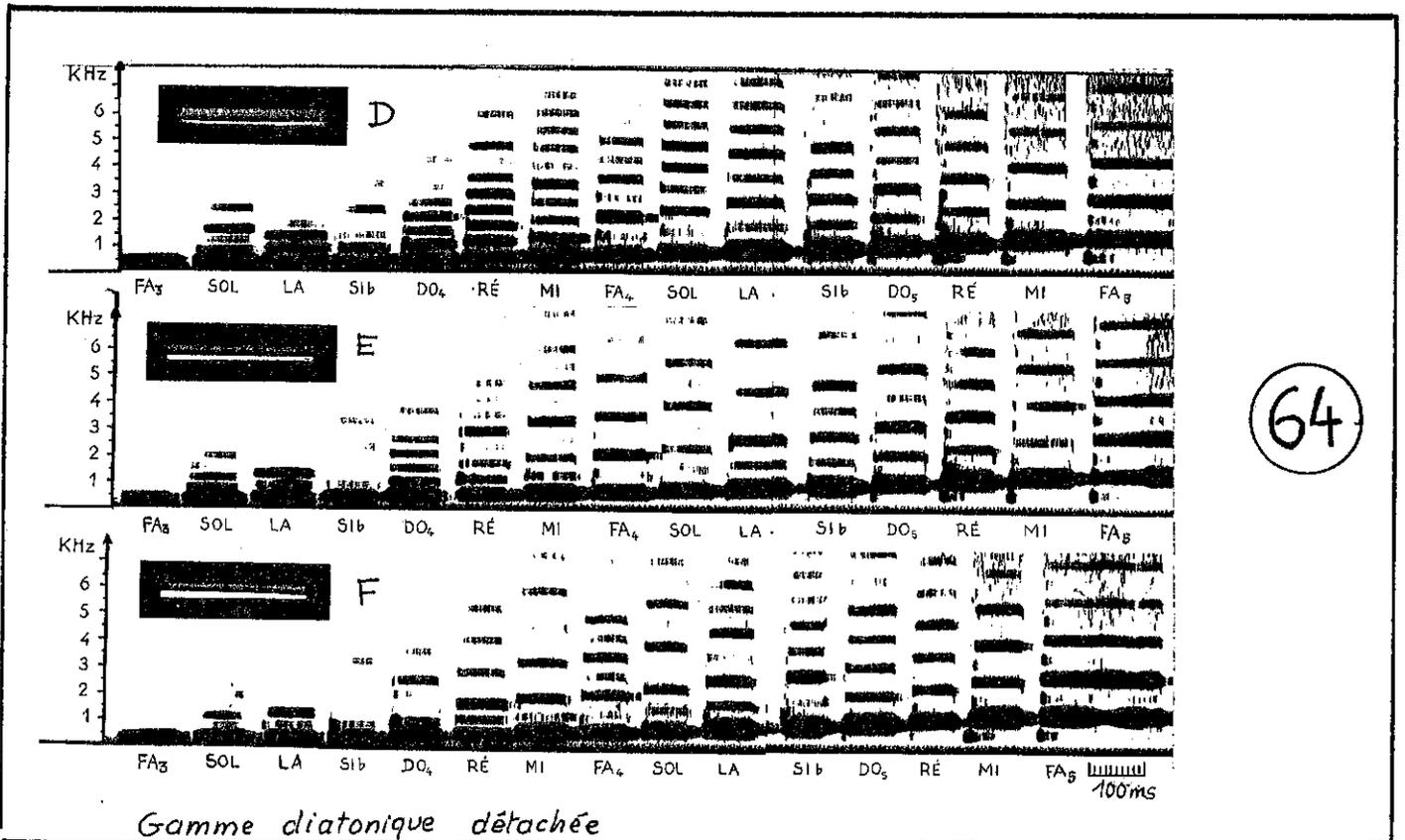
fig.64 Avec les réglages A et C il était difficile de jouer l'instrument en détaché, aussi avons nous effectué une deuxième série d'essais dans laquelle les réglages D et F sont respectivement un peu moins extérieur que A et un peu moins intérieur que C. La position médiane E est voisine de B comme le montrent les clichés de la lumière (fig.64).



63

FLÛTE A BEC ALTO

filtre large ($\Delta F = 300$ Hz)



64

Gamme diatonique détachée

Du point de vue du timbre on remarque à nouveau la présence de l'harmonique 2 lorsque le jet est extérieur (D) et la tendance à un spectre d'harmoniques impaires lorsqu'il est médian (E). La comparaison des positions B, E et F tend à montrer que le réglage autour de la position médiane est très critique.

Au jeu, et sur les analyses, on peut voir qu'un réglage plus extérieur tend à donner des attaques plus rapides et mieux définies mais passablement bruyantes dans l'aigu. Les harmoniques supérieurs s'établissent rapidement.

Au contraire, on observe en F un certain décalage entre le fondamental, toujours le premier à se mettre en route, et les harmoniques. Ceci confère à l'attaque une certaine mollesse et un caractère un peu sourd.

Etant donné le caractère qualitatif de ces expériences il n'est pas possible d'entrer plus dans les détails. Il faudrait reprendre la recherche avec un instrument réglable de façon plus précise, (au 1/20 de mm), et disposer simultanément d'une visualisation du jet.

Nous pouvons toutefois en tirer dès à présent les conclusions suivantes.

Lorsque le mouvement d'oscillation du jet est tel (biseau dans l'axe de symétrie, forces appliquées de part et d'autre de la lame d'air alternativement équilibrées) qu'il s'effectue régulièrement, les mouvements d'entrée et de sortie du jet ayant même durée, avec un temps d'arrêt aux positions extrêmes, il produit au niveau de la bouche une variation périodique de pression de type "carré", donnant naissance à un son où dominent les harmoniques impaires.

Au contraire, lorsque le réglage est tel (biseau fortement excentré) que l'oscillation du jet est très asymétrique et que l'aller et le retour ont des durées très différentes, on a une variation périodique du type "dents de scie" engendrant un spectre comprenant tous les harmoniques.

Il reste à expliquer pourquoi l'harmonique 2 apparaît lorsque le jet est orienté vers l'extérieur plutôt qu'à l'intérieur.

Cette expérience offre l'intérêt de se placer dans les conditions normales du jeu de l'instrument, ce qui permet de le tester en régime transitoire. L'analyse pour chaque réglage des sons de toute l'étendue de l'instrument montre que les phénomènes sont compliqués : l'apparition d'un spectre impair se manifeste pour les trois positions B, E et F mais n'affecte pas les mêmes notes.

Les résultats obtenus ici éclairent le rôle des chanfreins de la lumière (§ 2.43) et permettent de comprendre les remarques du facteur de flûtes. Un chanfrein

sur le bord interne de la lumière tend à dévier le jet vers l'intérieur, ce qui explique l'affaiblissement de l'harmonique 2 et des harmoniques pairs que nous avons constaté.

Enfin, cette expérience a le mérite de montrer une fois de plus combien le réglage de la bouche est déterminant dans le timbre d'une flûte à bec. Il faut donc être très prudent lors de l'étude d'autres paramètres comme par exemple le matériau, lorsqu'ils ont une action sur l'orientation et la diffusion du jet (cf § 3.76).

§ 2.56 - Conclusion

Les expériences portant sur l'orientation du jet montrent que ce paramètre joue un rôle important sur le timbre des sons en déterminant en grande partie la forme de l'oscillation du jet au niveau de la bouche. Il existe, pour une fréquence donnée un réglage optimum donnant satisfaction à la fois pour le transitoire d'attaque et pour le contenu spectral.

L'orgue est un cas idéal puisqu'un tuyau ne donne qu'un son et que l'harmoniste peut agir sur différentes parties de la bouche pour régler l'orientation du jet.

A la flûte traversière c'est au musicien d'adapter la direction du jet en fonction de la note qu'il joue et du timbre qu'il recherche.

Seule la flûte à bec pose réellement un problème difficile pour le facteur. Le réglage, fixé une fois pour toutes lors de la construction du bec doit offrir, sur une étendue de deux octaves un compromis satisfaisant entre la qualité du son, la netteté de l'attaque et l'intensité du grave et de l'aigu. On comprend que la construction d'un bon instrument soit une opération difficile.

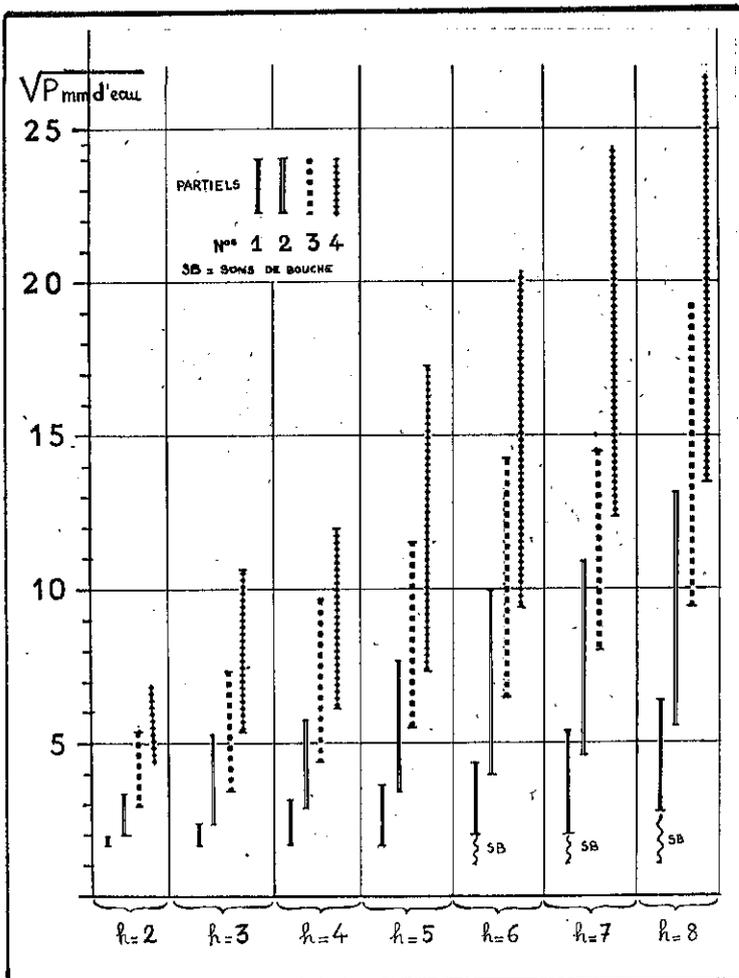
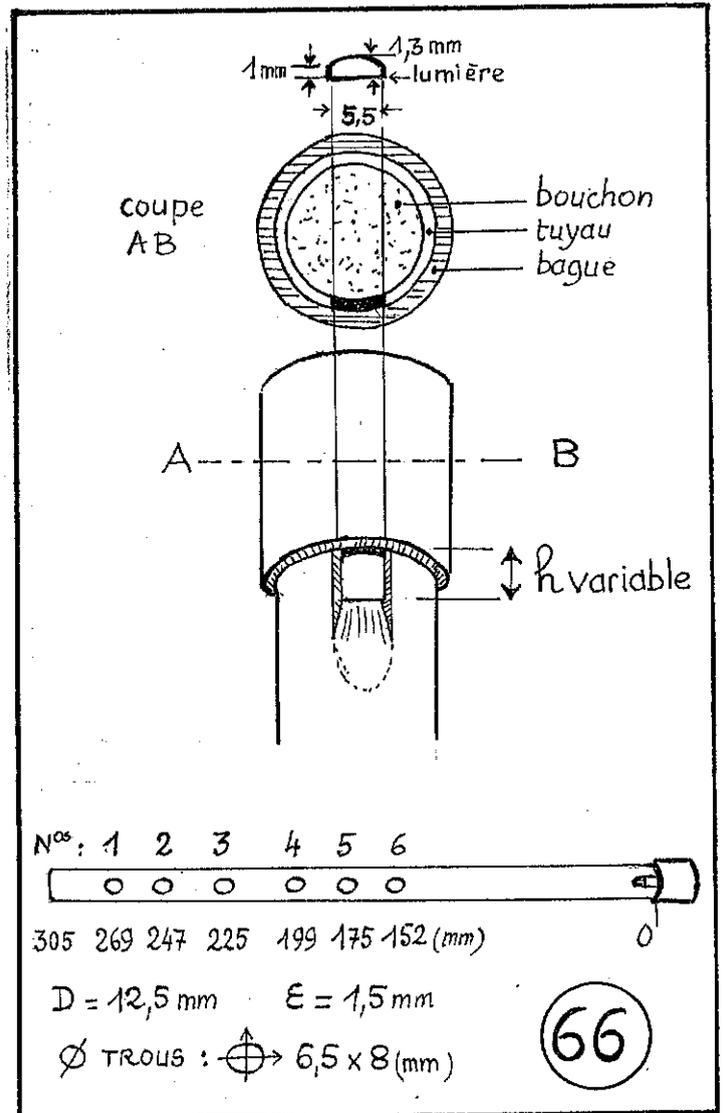
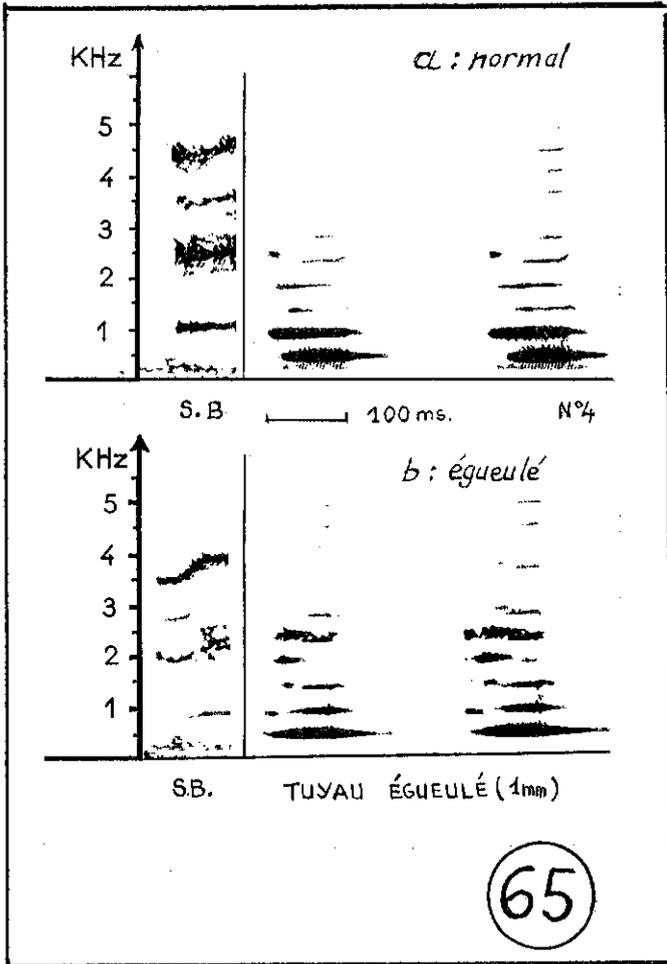
2) DISTANCE LUMIERE-BISEAU

VARIATION DE LA HAUTEUR DE BOUCHE ET DE LA SURFACE DE LA BOUCHE

§ 2.57 - Généralités

Le réglage de la distance lumière-biseau ou hauteur de bouche, ou également (orgue), ou longueur du jet (flûte traversière) est déterminant à de nombreux points de vue.

L'étude de la bouche isolée (§ 2.05) a permis de montrer le rôle de ce paramètre sur la fréquence des sons de biseau. Dès que l'on associe la bouche à un tuyau



apparaît un paramètre associé qui est le rapport de la surface de la bouche à celle du tuyau; nous en faisons l'étude au § 3.02. En effet, recouper la bouche d'un tuyau d'orgue c'est du même coup augmenter sa surface. Dans le jeu de la flûte traversière, l'avancée des lèvres par lesquelles on raccourcit la longueur du jet produit ipso facto un recouvrement plus grand de l'embouchure. (Il ne faut pas oublier en effet que la communication du tuyau avec l'air extérieur ne s'arrête pas au niveau du trou mais se fait dans un volume ("domaine du tuyau" de BOUASSE), qui s'étend bien au delà de l'orifice proprement dit. Tout obstacle dans ce domaine comme la lèvre supérieure du flûtiste, contribue à abaisser la fréquence donc à diminuer le rapport de l'ouverture à la bouche à celle du tuyau.)

En modifiant la distance lumière-biseau d'un tuyau on peut donc s'attendre à observer deux catégories de transformations.

- 1) Les modifications du son de biseau vont retentir sur l'attaque du tuyau (timbre) et la stabilité en pression des différents régimes, donc l'intensité du son.
- 2) Le changement d'ouverture à la bouche entraînera une variation de la fréquence fondamentale du tuyau et du rapport de fréquence des partiels donc de la composition spectrale.

On voit que l'opération est complexe.

Voyons tout d'abord une expérience simple avec un tuyau d'orgue lequel permet de bénéficier d'une excitation reproductible.

§ 2.58 - Expérience 1 - Egueulement d'un tuyau d'orgue

Un tuyau de taille moyenne donnant le LA3 (440 Hz) est placé sur le sommier expérimental. On enregistre le son de biseau isolé (en emplissant le tuyau de chiffons) et le son du tuyau avant, puis après recoupe de la bouche (fig.65).

Les sonagrammes montrent un changement considérable dans le timbre. Le tuyau, qui avait tendance à octavier a maintenant une attaque molle, de longue durée (40 ms). L'analyse montre bien les rapports entre les modifications du son de bouche et celles des bruits d'attaque.

Le timbre s'est appauvri : les harmoniques élevés ont diminué en nombre et en intensité. On constate par ailleurs que la fréquence fondamentale du tuyau a augmenté de 3 savarts.

On peut rattraper le tuyau en ouvrant le pied, ce qui fait croître la pression, mais ceci n'est possible que si le tuyau était primitivement trop bas puisque

...../

cette opération augmente encore la fréquence.

§ 2.59 - Expérience 2 - Flûte à bec à hauteur de bouche variable.

fig.66 L'instrument que nous avons construit permet de régler simplement la hauteur de bouche en déplaçant conjointement le bouchon et la bague extérieure recouvrant le bec (fig.66). On prend toujours bien soin d'aligner les deux bords de la lumière (bouchon et bague). Ce dispositif a pour inconvénient de modifier du même coup la longueur du tuyau, mais il est facile de conserver au tuyau une longueur constante en recoupant l'extrémité inférieure de la même quantité dont on agrandit la bouche.

a) Variation du champ de liberté en pression des partiels.

fig.67 Sur la figure 67 on a représenté pour chaque hauteur de bouche (de $h = 2$ à $h = 8$ mm) les zones d'existence en pression des 4 premiers partiels.

On voit nettement que lorsque h croît l'intervalle $\Delta \sqrt{P}$ dans lequel un partiel donné est stable croît en étendue, en même temps qu'il se décale vers les pressions plus élevées.

Ceci a plusieurs conséquences :

- 1 - Un partiel de rang inférieur, par exemple le partiel 1 est d'autant plus stable que la bouche est haute.
La limite supérieure d'octaviation (passage du régime 1 au régime 2) recule lorsque h croît.
- 2 - L'intensité qui est liée à la pression d'alimentation croît également avec la hauteur de bouche.
- 3 - Pour une pression donnée le tuyau émettra tel ou tel partiel selon la hauteur de bouche.

Ex : pour $\sqrt{P} = 5$ on a

$h = 2$	$h = 5$	$h = 8$
P3 ou P4	P2	P1

Nous verrons l'importance de ce réglage pour la flûte traversière.

- 4 - Le nombre des partiels possibles est lié à la hauteur de bouche mais de façon plus complexe.

En effet, si h est trop petit (ex $h = 2$) la bouche ne fonctionne que dans

un intervalle de pression réduit. Au delà d'une certaine valeur ($\sqrt{P} = 7$) le son s'évanouit; l'intensité est par ailleurs très faible.

Si h est trop grand, ($h = 10$) les pressions nécessaires deviennent si élevées que le souffle et le bruit croissent rapidement entraînant la dégradation du son.

En portant le nombre de partiels possibles en fonction de la hauteur de la bouche on obtient la figure 68 qui montre que l'optimum de fonctionnement de notre tuyau a lieu pour $4 < h < 6$ mm.

Enfin on notera l'apparition de sons de bouche précédant l'émission du partiel 1, d'autant plus stables et intenses que la distance lumière-biseau croît. Les facteurs d'orgues l'ont bien remarqué. On lit dans Dom BEDOS (T II p.426) " Pour connaître si un tuyau est trop égueulé on soufflera dedans très légèrement. S'il rend tout autre son et tout autre ton qu'il ne doit sonner lorsqu'il a son plein vent, ce sera une marque qu'il sera trop égueulé ".

b) Variation de la fréquence avec la hauteur de bouche.

Lorsque h passe de 2 à 8 mm la fréquence fondamentale du tuyau monte de plus d'un demi-ton.

Rappelons tout d'abord que la modification de fréquence due au recul du bouchon a été compensée par recoupe du tuyau. La montée en fréquence est donc le résultat de deux facteurs conjugués qui sont : l'agrandissement de l'ouverture de la bouche et l'augmentation de pression. En effet, le champ de liberté en pression des partiels se déplaçant avec la variation de h il est peu réaliste d'étudier l'évolution de la fréquence du tuyau à pression constante. Il faut tracer les courbes de variation fréquence/pression pour chaque hauteur de bouche.

En alimentant le tuyau avec de l'azote comprimé et en relevant les fréquences point par point nous avons tracé les courbes d'évolution du fondamental pour 4 hauteurs de bouche (fig. 69). Comme nous l'avons vu dans l'expérience précédente la zone utile de la courbe pression croît en étendue avec h et se déplace vers les hautes pressions. Rappelons que les parties quasi-verticales de ces courbes correspondent au régime buccal et ne sont pas utilisées en musique. On peut constater que la pente moyenne de la zone utile diminue au fur et à mesure que h croît.

Ex : $2 < \sqrt{P} < 3$ mm $h = 5$ mm la fréquence monte de 15 savarts
 $4 < \sqrt{P} < 5$ mm $h = 8,5$ mm la fréquence monte de 7 savarts

.../

Cette remarque permet de lever l'apparente contradiction entre nos résultats et les propos d'un facteur d'orgue (HARTMANN) qui nous apprenait qu'une bouche basse est plus stable en fréquence qu'une bouche haute. Si l'on considère le fait que le champ de liberté en pression d'une bouche haute est plus grand on voit que l'intervalle total de fréquence sur lequel cette bouche fonctionne est en fait plus grand que celui d'une bouche basse, bien que la loi de montée avec la pression soit en réalité plus faible.

Remarque : Le relevé des courbes complètes fréquence/pression permet également de lever le paradoxe signalé par BOUASSE ((2) p.150) lors d'une expérience avec un tuyau d'orgue à lèvres supérieure réglable; il signale que lorsque h augmente la fréquence mesurée à pression constante croît, passe par un maximum puis décroît. L'explication est simple à la vue de ces courbes. Prenons nous par exemple à $\sqrt{P} = 1,8$, on a successivement pour

$h = 2$ SI3 + 5 sav.

$h = 3$ SI3 + 8 sav.

$h = 5$ SI3 0 sav.

Pour la dernière valeur de la bouche nous sommes en dehors de la zone utile (courbe buccale).

c) Variation de la hauteur de bouche et timbre du tuyau

Percos 6 trous dans le tuyau afin de pouvoir jouer un peu de musique et connaître le rôle de la hauteur de bouche sur le fonctionnement normal du tuyau.

Pour l'analyse au sonagramme jouons simplement une gamme ascendante en débouchant les trous un à un et en articulant les sons avec " Te ". Les chiffres de 0 à 6 indiquent le nombre de trous découverts depuis le bas, d'abord en régime 1 puis en régime 2. On peut voir sur la figure 70 l'analyse pour 3 hauteurs de la bouche.

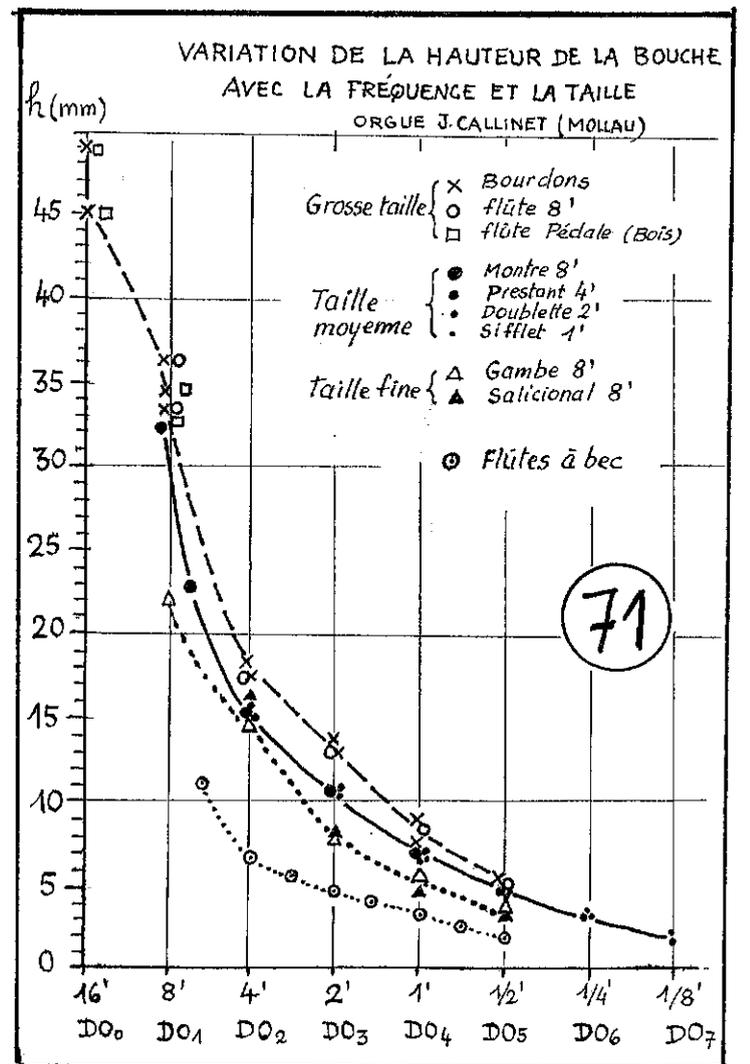
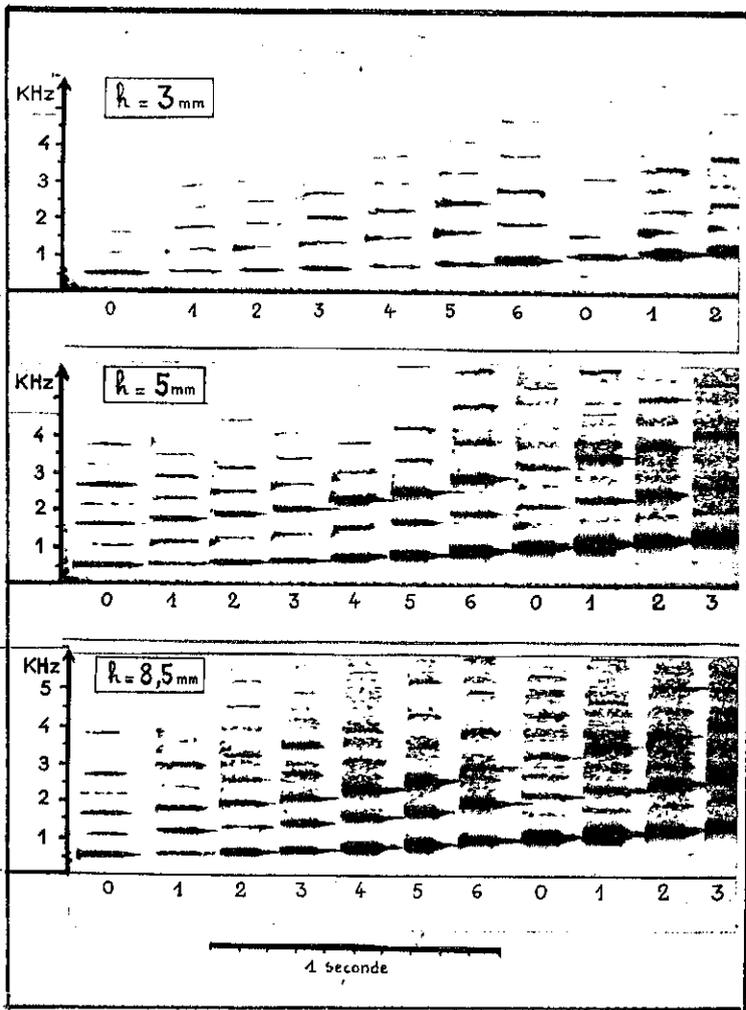
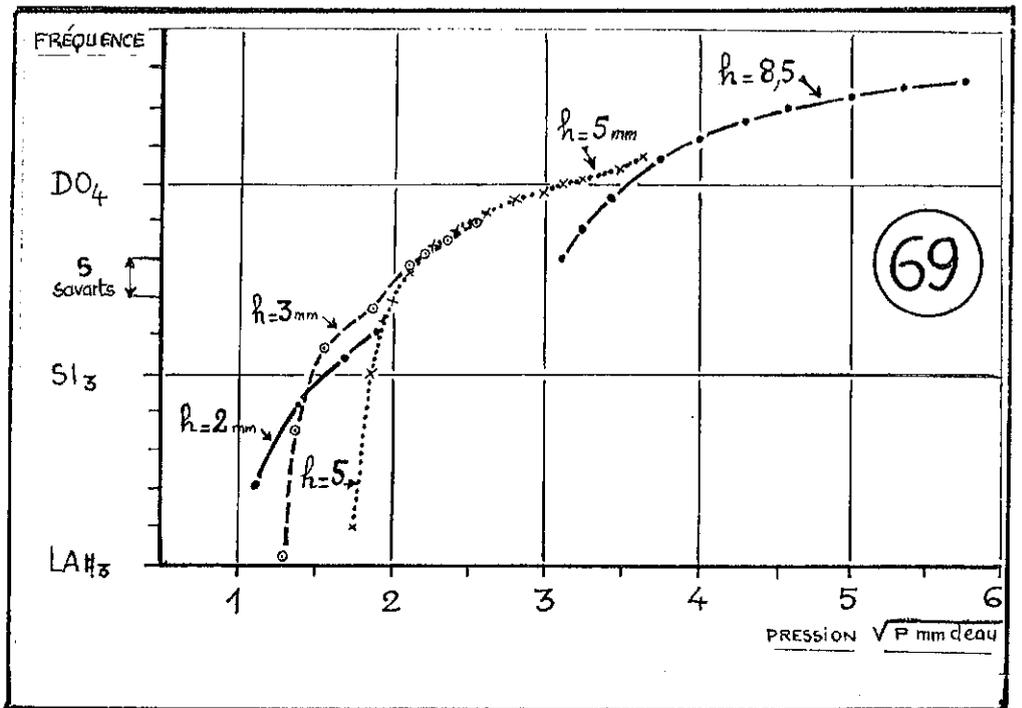
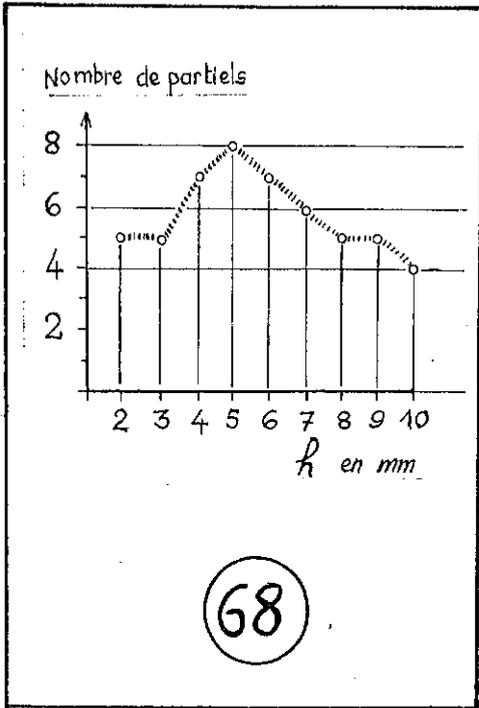
fig.70

Les résultats confirment que le réglage intermédiaire est un optimum pour le tuyau considéré, permettant à la fois un son intense, d'attaque franche et bien pourvu en harmoniques.

Avec une bouche plus basse ($h = 3$) le tuyau a une attaque incertaine, octavante (voir 1 à 6) et reste d'intensité faible.

Si la bouche est plus haute ($h = 8,5$) on voit apparaître rapidement un bruit de souffle important qui se superpose aux harmoniques au point de les éclipser complètement dans l'aigu où ne subsiste que le fondamental.

...../



On ne note pas de modification essentielle dans les rapports d'intensité des harmoniques, sinon le léger renforcement de l'harmonique 2 lorsque h croît, explicable par le fait qu'avec l'agrandissement de la surface de la bouche la justesse des parties s'améliore.

§ 2.60 - Variation de la hauteur de bouche avec la fréquence et la taille

1) Orgue

fig.71

A partir des mesures effectuées par M. MEYER-SIAT (Cf. Bih.) sur l'orgue Callinet de Mollau, portons sur un graphique la hauteur de bouche en fonction de la fréquence fondamentale du tuyau mesurée en pied (*). Bien que nous n'ayons que peu de mesures nous pouvons tracer des courbes satisfaisantes (fig.71).

Les points de mesures relevés sur la montre 0', le prestant 4' la doublette 2' et le sifflet 1' qui sont tous des " principaux " (jeux de taille moyenne) sont très voisins. Ils dessinent une courbe d'allure hyperbolique qui traduit l'expérience empirique des facteurs classiques.

Considérons par exemple le tuyau de 2' pour lequel $h = 10$ mm. A l'octave supérieure, le tuyau de 1' dont la bouche a 7 mm de hauteur est proportionnellement plus égueulé, c'est à dire que le fondamental a des chances d'être plus intense que les harmoniques supérieurs. Cette tendance s'accroît au fur et à mesure que l'on va vers les aigus. Au contraire, le tuyau de 4', à l'octave inférieure, a une bouche proportionnellement plus basse (15 mm au lieu de 20), ce qui favorise l'intensité des harmoniques élevés mieux perçus par l'oreille.

Sur le même graphique portons les mesures effectuées sur d'autres types de jeux. On voit que la gambe et le salicional, jeux de taille fine ont, pour une même fréquence, une bouche plus basse. Au contraire, flûtes et bourdons (grosse taille) sont plus égueulés. Ces courbes sont bien individualisées dans le médium tuyaux de 2 et 1') et se rejoignent aux extrémités où l'oreille est moins sensible.

2) Flûte à bec

Ayant mesuré la hauteur de bouche de plusieurs instruments modernes de la grande basse (Fa1) à la soprano (Do5) portons les points sur le même graphique en

(*) NOTE : On repère la tessiture d'un jeu d'orgue par la longueur du tuyau le plus grave; cette longueur est traditionnellement exprimée en "pied". Pour la France, un pied de roi équivaut à 32,48 cm. Rappelons qu'un pied vaut 12 pouces (1' = 12") et qu'un pouce vaut 12 lignes (1" = 12 l)

plaçant une flûte donnée à la fréquence qui correspond au fondamental de l'instrument.

Ex.: la flûte à bec soprano (fondamental DO 4) a en moyenne une hauteur de bouche de 3,25 mm. C'est beaucoup moins que les tuyaux d'orgue de même fréquence, même de taille très fine. Mais la flûte est construite pour fonctionner sur 2 octaves : sa limite supérieure est DO6. On constate alors, pour chaque type d'instrument, que la hauteur de bouche semble être réglée pour le son le plus aigu qu'il doit émettre.

§ 2.61 - Flûte traversière - Réglage de la longueur du jet

Sur cet instrument une grande partie des sons de la deuxième octave se joue avec les mêmes doigtés que ceux de la première octave, en utilisant le partiel 2. Le choix de l'octave dépend donc totalement de l'embouchure.

Les pédagogues de l'instrument insistent tous sur le fait qu'il ne faut pas "pousser l'air" pour passer à l'octave supérieure mais réduire l'ouverture de la lumière en avançant légèrement la mâchoire inférieure et les lèvres (QUANTZ ch. IV § 9,13 et 17 - ROCKSTRO § 7 34 - LE ROY p.55).

Réduire l'ouverture des lèvres permet d'augmenter la vitesse de l'air du jet sans augmenter parallèlement le débit. En fait la pression mesurée dans la bouche du musicien croît avec la fréquence, mais la mise en garde des professeurs est importante pour que les autres mécanismes puissent se créer.

Seul ROCKSTRO signale (§ 7 53) qu'il y a avantage à former un jet plus court pour l'aigu. Pourtant le fait d'augmenter la couverture du trou d'embouchure ou d'avancer les lèvres sur le trou comme le recommande QUANTZ pour l'aigu entraîne également une réduction de la distance lumière-biseau.

L'observation attentive des instrumentistes, qu'il s'agisse de flûte traversière, de Quena, montre d'ailleurs assez nettement ce mouvement.

fig 67
Pl. 25

Si l'on se reporte à la figure 67 on comprend l'intérêt d'un tel réglage : En avançant les lèvres d'une petite quantité par exemple 1 mm, le musicien peut déplacer à son gré la pression de passage du partiel 1 au partiel 2 donc émettre à volonté un son ou son octave. Le mouvement se fait très rapidement et n'entraîne pas de perturbations dans le souffle, difficulté que connaissent bien les flûtistes à bec.

Dans le tableau des paramètres qu'il se propose d'étudier, Y. ANDO donne à la longueur du jet une variation de 6 à 8 mm pour le grave et 5 à 7 mm pour l'ai-

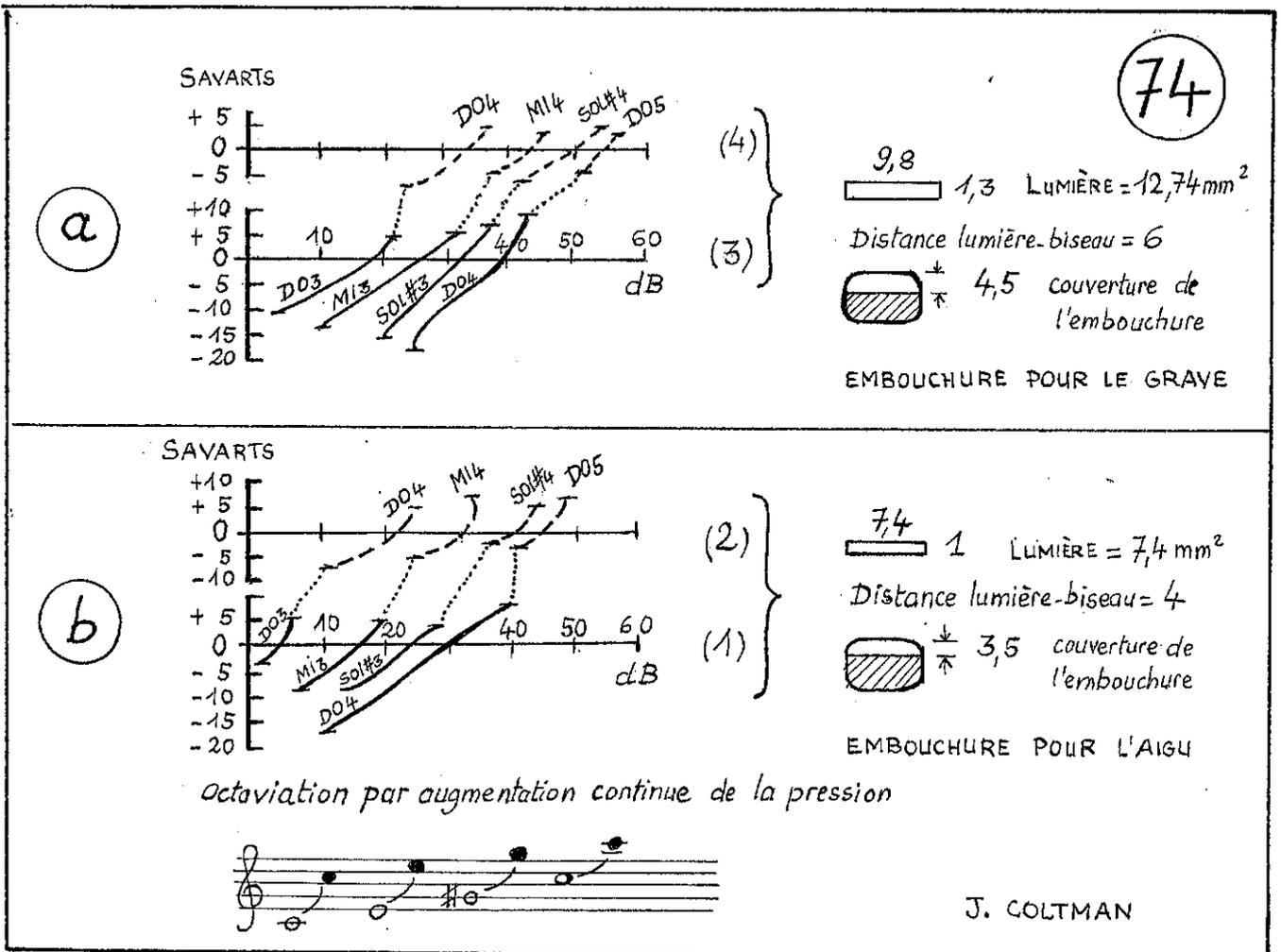
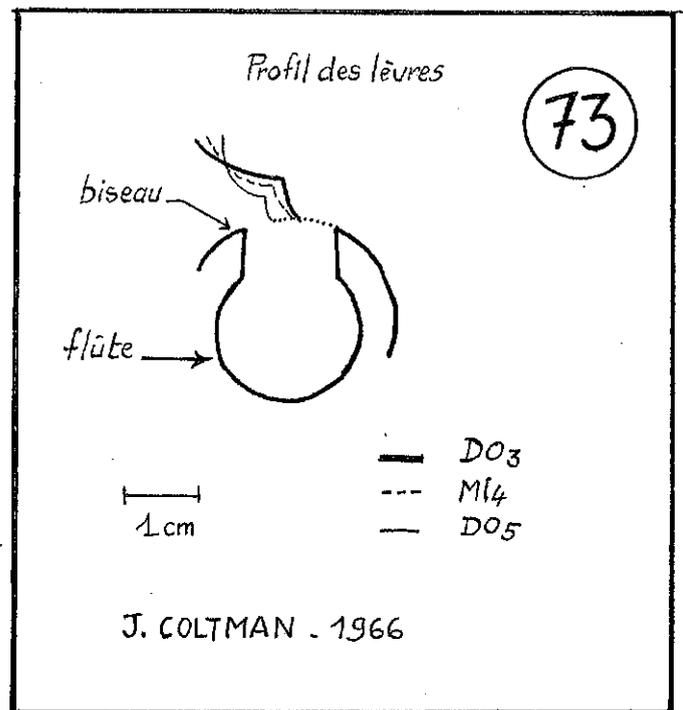
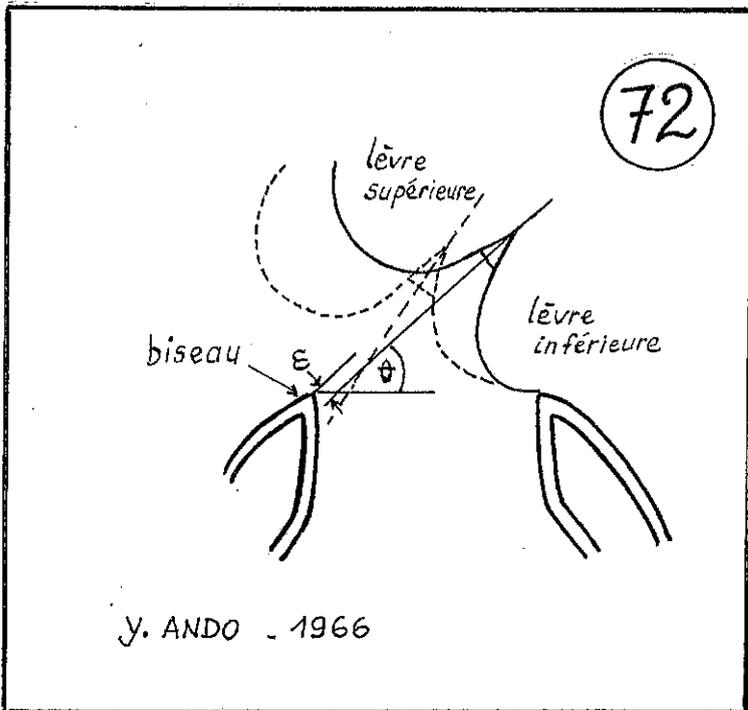


fig.72 gu. (fig.72 et 56).

fig.73 Enfin J. COLTMAN (fig.73) montre à l'aide de photographies prises sur lui-même en cours de jeu, que lors du passage du grave à l'aigu l'avancée des lèvres produit simultanément un recouvrement du trou d'embouchure et une diminution de la distance lumière-biseau. Puis en excitant la flûte avec un dispositif mécanique il trace les courbes de variation de la fréquence en fonction de l'intensité, obtenues par augmentation croissante de la pression d'alimentation. Nous avons reproduit ces courbes fig.74 pour les quatre notes D03, M13, SOL \sharp 3 et D04 ainsi que leurs octaves respectives.

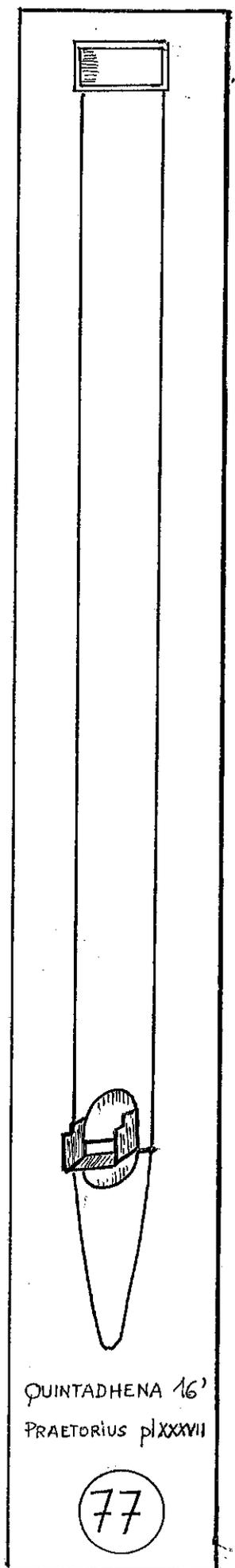
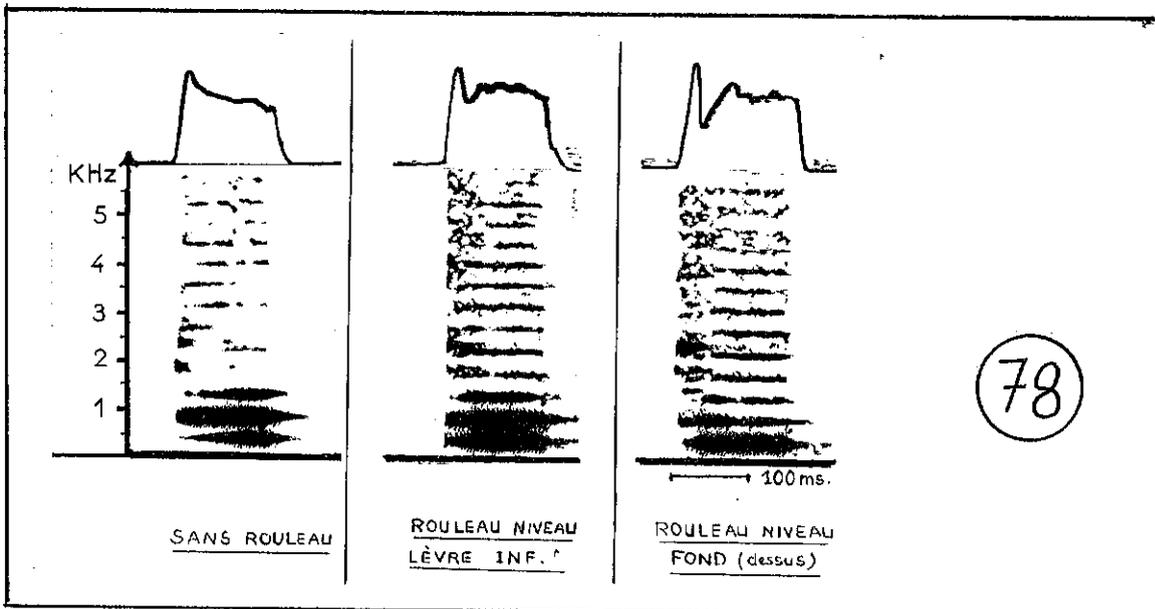
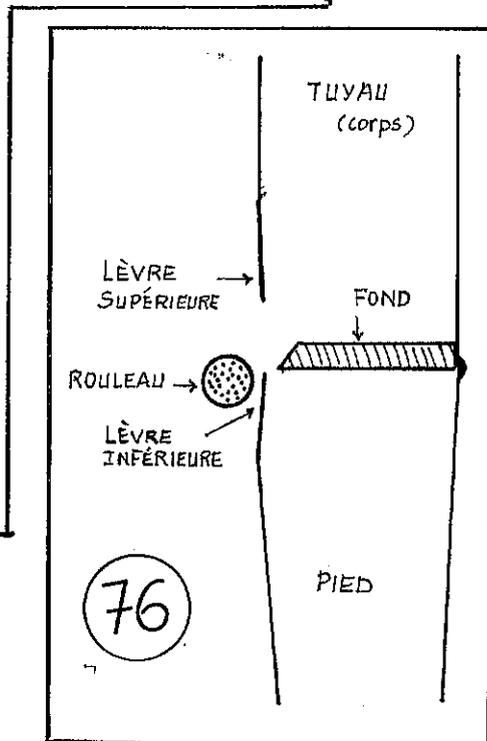
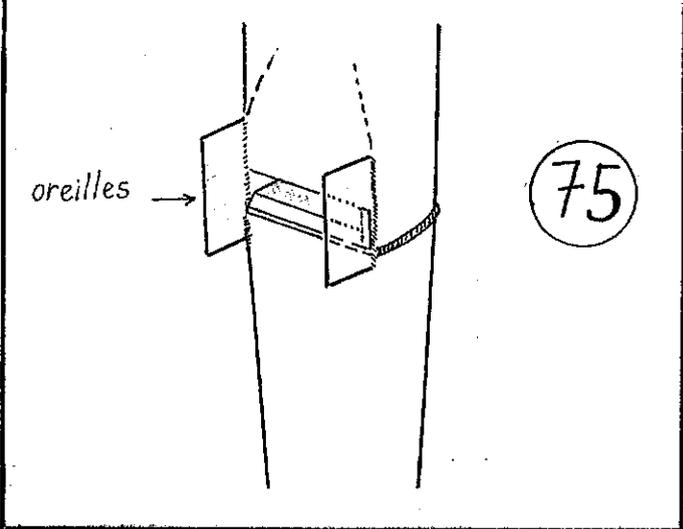
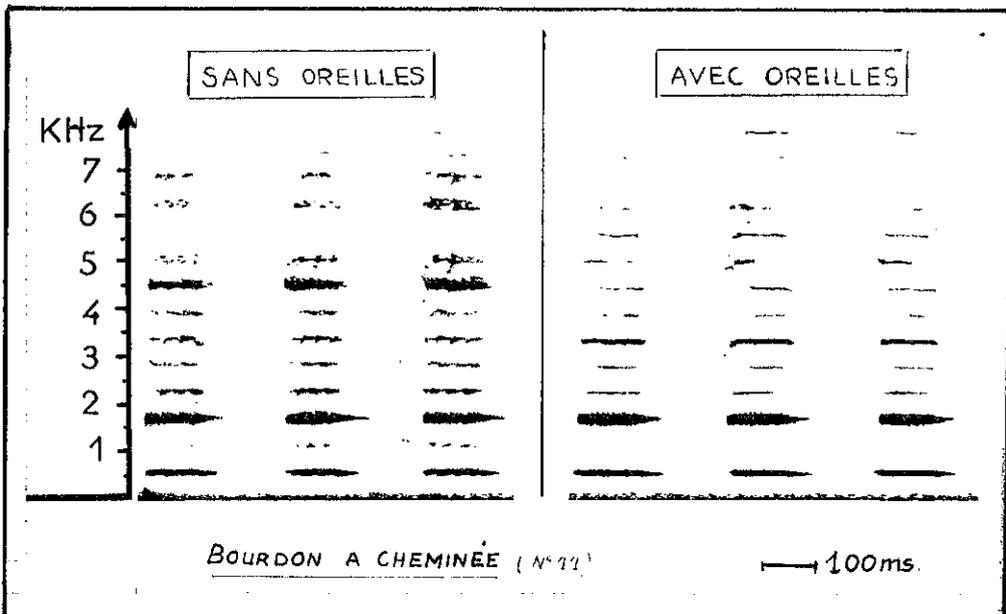
Désirant reproduire au mieux le jeu réel COLTMAN a établi ces courbes pour 2 réglages de l'embouchure en changeant simultanément 3 paramètres. Entre la fig.a et la figure b, la lumière a été réduite, le jet raccourci, l'embouchure couverte. (données numériques sur la figure). L'auteur montre ainsi que le partiel 1 est plus intense et plus stable dans les conditions (a) et que le partiel 2 apparaît à plus faible pression dans les conditions (b). On aura donc avantage à modifier l'embouchure dans le sens proposé pour passer par exemple de M13 à M14, aisément, et sans augmenter l'intensité de façon trop importante.

§ 2.62 - Conclusion

La distance lumière-biseau régit essentiellement la stabilité en pression des partiels, donc l'intensité du son et son attaque. Pour une fréquence donnée et une orientation donnée du jet il existe une longueur du jet optimum. Les facteurs d'orgue déterminent empiriquement cette distance par une règle liant la hauteur à la largeur de la bouche. Comme cette dernière est elle-même liée au diamètre du tuyau ils tiennent ainsi compte implicitement de la taille, qui est également importante (cf. § 3.07).

La flûte à bec est réglée en fonction de la fréquence supérieure de son étendue. Avec une bouche trop basse on pourra toujours jouer les sons graves, quoique faibles, mais une bouche trop haute ne permet pas, même en augmentant le souffle de sortir les partiels aigus.

Enfin nous avons vu que la distance lumière-biseau est un paramètre fondamental du jeu de la flûte traversière où il permet le passage rapide de l'aigu au grave, indépendamment de la variation d'intensité. Mais il faut rappeler qu'en avançant les lèvres (inférieure ou supérieure) on diminue obligatoirement l'ouverture du trou d'embouchure, ce qui entraîne des modifications dans la justesse des partiels. Celles-ci sont compensées comme on le verra (§ 3.67) par la conicité de la tête.



3) ROLE DES PAROIS LATÉRALES DE LA BOUCHE ET DE CERTAINS ACCESSOIRES :OREILLES, ROULEAU

Selon la géométrie de la bouche le jet peut franchir librement l'espace compris entre la lumière et le biseau ou au contraire se trouver canalisé par des parois latérales. La flûte traversière, le noy sont dans le premier cas, les flûtes à bec dans le second. Le tuyau d'orgue en étain, d'épaisseur très faible, peut être considéré comme étant dépourvu de parois latérales à la bouche. En étudiant, pour cet instrument le rôle de deux accessoires : les " oreilles et le rouleau " nous pourrions en tirer des conclusions applicables aux autres instruments.

§ 2.63 - Tuyau d'orgue - les oreilles

Il est d'usage de garnir la bouche des tuyaux bouchés (bourdons) de plaques latérales soudées perpendiculairement au plan de la bouche et de même hauteur que celle-ci. Comme elles sont déformables elles jouent un double rôle :

- 1) Ces parois canalisent l'écoulement et assurent, pour un régime donné une stabilité sur un plus grand intervalle de pression. Ce qui est vrai pour le son de bouche (§ 2.07) l'est aussi pour le tuyau à bouche.
- 2) En rapprochant les oreilles l'une de l'autre on recouvre partiellement l'orifice de la bouche ce qui a pour effet de modifier les fréquences des partiels. Cette action a deux conséquences pratiques. D'une part la fréquence fondamentale du tuyau baisse, la marge de réglage étant de l'ordre de 10 savarts, d'autre part le rapport de justesse des partiels se modifie. Les facteurs d'orgue le savent bien : ils pratiquent de fines retouches d'accord des tuyaux bouchés en fermant plus ou moins les oreilles. Enfin lorsqu'un tuyau, sur le point de quintoyer, " grésille " trop ou produit des battements, on peut dans la plupart des cas lui donner un son convenable pour une position donnée des oreilles en accordant au mieux le partiel 2 (voisin de l'harmonique 3) sur le fondamental.

fig.75

La figure 75 où l'on voit l'analyse d'un tel tuyau avant et après réglage des oreilles, montre clairement la stabilité du son obtenue par ce moyen.

§ 2.64 - Tuyau d'orgue - le rouleau

Avec l'emploi de jeux en métal de taille très fine et la tendance à une harmonisation à forte pression les facteurs ont été amenés à concevoir un dispositif donnant une plus grande stabilité au fondamental de certains tuyaux (gambe, salicional)

Il s'agit d'un petit cylindre de métal que l'on place devant la bouche, à la hauteur du fond (fig.76).

Pour en montrer le rôle faisons l'expérience suivante. Un tuyau ouvert étant placé sur la gravure, augmentons progressivement la pression du vent. La fréquence du tuyau monte. Vers 70 mm d'eau le son devient instable et à 90 mm d'eau il saute au régime 2. Recommencons la même expérience avec le tuyau muni d'un rouleau. A 70 mm d'eau le tuyau est encore parfaitement stable; vers 100 mm on entend quelques altérations du son. Le tuyau n'octavie finalement que vers 125 mm d'eau. Ces valeurs varient selon la position du rouleau, mais en règle générale, le rouleau permet de reculer la limite supérieure d'octavation, ce qui augmente le champ de liberté en pression du partiel 1 : le réglage du tuyau en est facilité. Notons que la limite inférieure du partiel 2 n'étant pas modifiée, le rouleau augmente en fait la zone de recouvrement commune à deux partiels voisins. On peut voir clairement sur une gravure de PRAETORIUS (Bib. Pl. XXXVII) des tuyaux de Quintaton possédant, en plus des oreilles, une plaque de métal parallèle à la lèvres inférieure et perpendiculaire à son plan (fig.77) (comme un frein). Or le quintaton est harmonisé de telle sorte qu'on entend simultanément le fondamental et l'harmonique 3 (d'où son nom).

Si nous faisons l'analyse au sonographe d'un tuyau près d'octavier avec puis sans le rouleau, nous constatons (fig.78) une grande différence dans l'attaque. 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 (plus faible que celle de l'harmonique 2) qu'avec un retard de 100 ms environ. Avec le rouleau, l'harmonique 1 n'a plus qu'un retard de 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).

Nous sommes mal renseignés sur le rôle aérodynamique du rouleau. Faute de visualisation nous sommes réduits à des suppositions. On sait que si l'on place un obstacle de forme cylindrique dans un courant aérien les filets d'air le contournent, glissent dessus, comme s'ils étaient attirés par celui-ci. On peut penser que lors de l'oscillation du jet vers l'extérieur, les filets d'air, attirés par le rouleau, ont tendance à s'enrouler dessus, ce qui stabilise, amplifie le mouvement latéral du jet et retarde le passage au régime 2.

BOUASSE (3) T I p.280) ne donne pas d'explication au rôle du rouleau.

Lors d'une expérience effectuée avec le son de biseau, BROWN a constaté que

...../

lorsqu'on approche un plan rigide près du jet, à 2 mm au-dessus de la lumière, celui-ci est dévié en direction de l'obstacle ainsi créé (Bib. (2)).

Placer un rouleau revient donc à attirer le jet vers l'extérieur. Mais l'effet n'est pas celui d'une simple translation de la direction moyenne du jet : le rouleau doit agir également sur la durée pendant laquelle le jet passe à l'extérieur du tuyau. Tant que cette durée est grande, le régime 2, qui nécessite une oscillation du jet deux fois plus rapide ne peut pas s'installer.

§ 2.65 - La flûte à bec réglable. Ex. : le caval turc

Le " rouleau " est utilisé depuis longtemps dans le jeu de certaines flûtes à bec. Il s'agit d'instruments dont la bouche, située du côté opposé aux trous latéraux possède un canal court, de l'ordre de 15 mm. Pour jouer l'instrument le musicien introduit une portion du bec dans la bouche et peut facilement placer sa lèvre inférieure au niveau de la bouche (fig.79). Il dispose ainsi d'un " rouleau " réglable avec la tessiture. Les parois de la flûte sont suffisamment épaisses pour que la lèvre reste à distance de l'ouverture de la bouche et ne risque pas d'obturer la lumière. Dans le cas de la flûte à bandeau d'Indonésie, c'est la hauteur de celui-ci qui permet de reposer la lèvre afin de régler commodément le jeu.

Note : Les instruments de musique faits pour le touriste ne pèchent pas seulement par la justesse et la qualité du son. Nous avons un caval turc où le canal, trop long (30 mm) ne permet plus d'atteindre la bouche pour jouer avec cette technique originale.

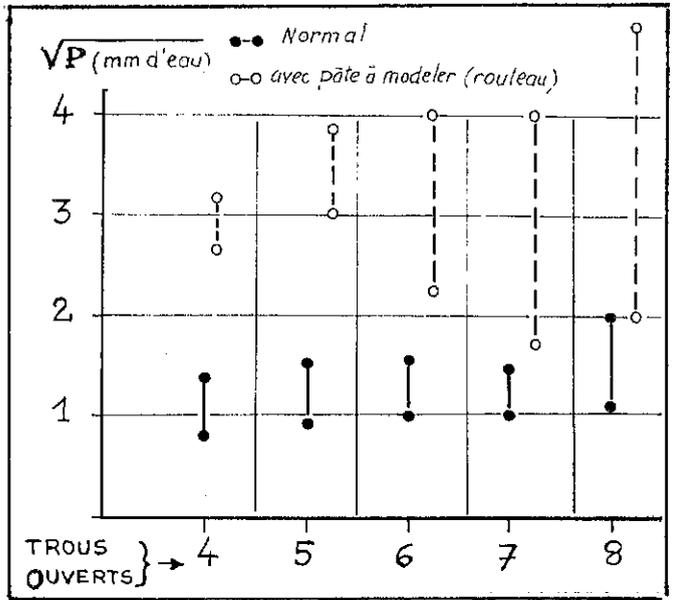
Expérience : Le caval turc étant de taille très fine (fiche n° 7) le champ de liberté en pression des fondamentaux est réduit et situé vers les faibles valeurs : de 0,3 à 4 mm d'eau pour les 9 fondamentaux de l'instrument.

Les sons de la première octave, d'intensité très faible et instables sont pratiquement inutilisables.

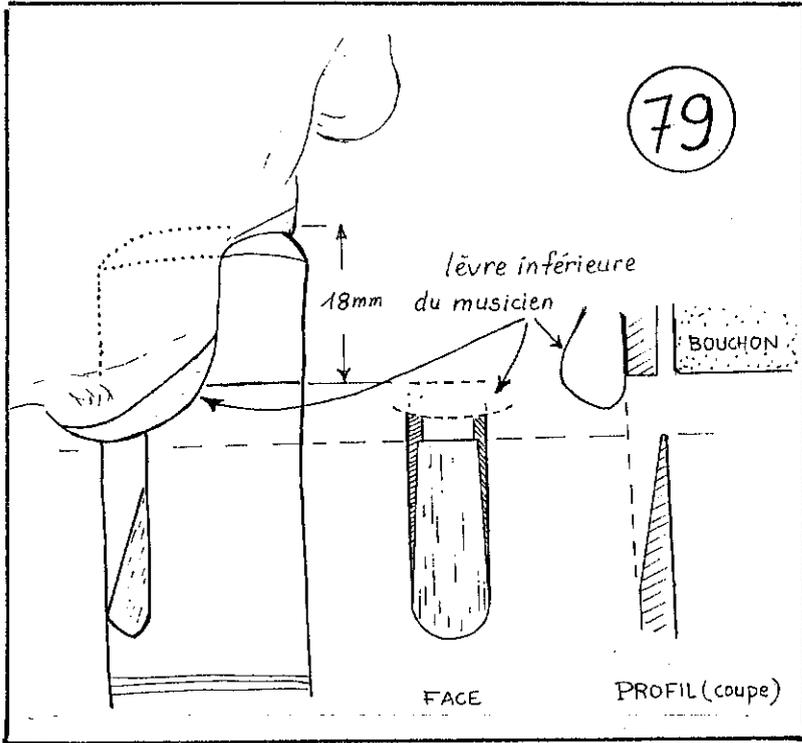
Disposons sur la bouche un morceau de pâte à modeler simulant la lèvre inférieure du musicien et mesurons les limites supérieure et inférieure de stabilité en pression du fondamental pour différentes combinaisons de trous (fig.80). Par comparaison avec les valeurs mesurées sur l'instrument ordinaire on constate à la fois un déplacement du champ de liberté vers des valeurs plus élevées et une augmentation importante de l'étendue pour les notes 6, 7 et 8. Le rouleau, tel que nous l'avons placé, rigide pour les besoins de l'expérience était réglé aux mieux pour ces trois notes. (Les sons plus graves que 4 ne sortaient pas). Lors du jeu le musicien peut régler à la fois la position et la tension de la lèvre inférieure (épaisseur du rouleau) en

...../

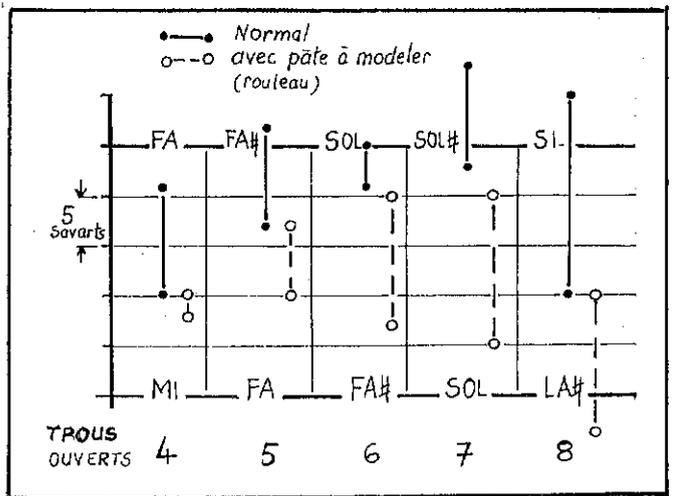
80 →



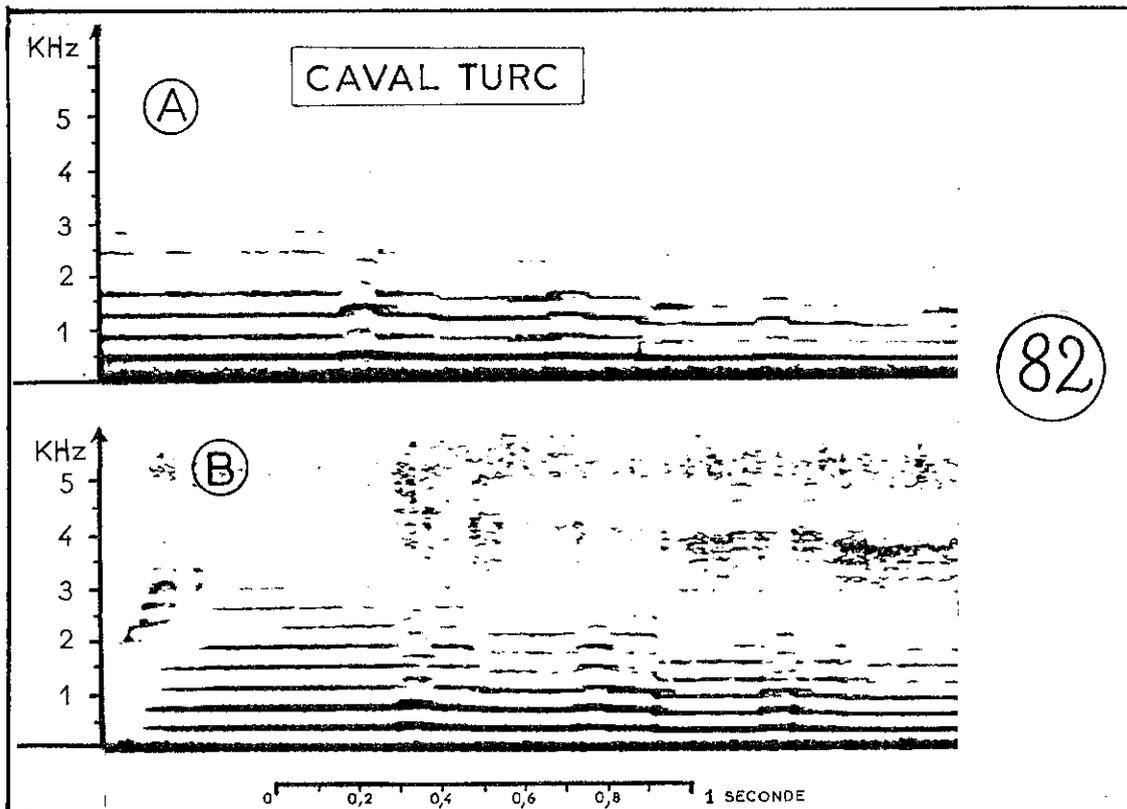
79



81 →



82



fonction de la note qu'il joue. Cette technique accroît vers le grave l'étendue d'un instrument, conçu par ailleurs pour émettre un grand nombre de partiels aigus (taille très fine, trous bas placés).

Parallèlement à la modification de pression, le rouleau entraîne un changement de fréquence dû au recouvrement de la bouche, et une modification importante du timbre.

fig.81 Lors de la même expérience nous avons relevé le champ de liberté en fréquence des sons utilisables (fig.81). L'instrument parle pour des pressions plus fortes, mais la fréquence des sons examinés est abaissée assez régulièrement d'environ 1/4 de ton.

fig.82 Outre l'intensité plus grande, possible avec cette technique de jeu, on obtient également un timbre particulier en jouant simultanément sur les régimes 1 et 2, ce qui produit un son clair, stable, où l'octave, intense, est nettement perceptible. L'émission est généralement accompagnée d'un souffle important qui peut être recherché du point de vue esthétique; On pourra comparer les deux sonagrammes de la figure 82 où l'on a enregistré la même mélodie sans, (A) et avec, (B) la technique du "rouleau". La correction d'intensité, nécessaire pour les besoins de l'analyse est de 20 dB.

§ 2.66 - Rôle de l'épaisseur des parois de la flûte à bec

Le tuyau des flûtes à bec historiques et modernes a généralement une épaisseur assez considérable à la bouche. Ainsi pour une flûte alto dont les dimensions de la bouche sont $l \times h = 12 \times 4$ mm, l'épaisseur des parois est de 7 mm. Si la raison principale est mécanique : éviter que le bois se fende sous l'action de l'humidité s'accumulant dans le canal, il est certain que ces parois jouent également un rôle sur le fonctionnement de la bouche, en étant à la fois des oreilles et un rouleau. La construction de bouches avec des tuyaux en matière plastique de faible épaisseur (1 à 2 mm) ne donne jamais de résultats très satisfaisants; en particulier il est difficile d'obtenir des sons graves intenses et d'attaque sûre.

fig.83 Ayant construit un instrument en parois minces il était possible d'augmenter l'épaisseur à certains endroits seulement : au bord externe de la lumière (A), aux parois latérales de la bouche (D) ou au biseau (B) (cf. fig. 83). Nous avons alors mesuré l'évolution de la fréquence des deux premiers partiels, en fonction de la pression, pour différentes combinaisons : parois minces, A seul, D seul, et A + D + B (parois épaisses).

On a tracé sur la même figure les courbes du partiel 1 et du partiel 2 qui sont normalement à une octave de distance. Ceci permet de mieux apprécier leurs rap-

fig.84. ports de justesse (fig.84).

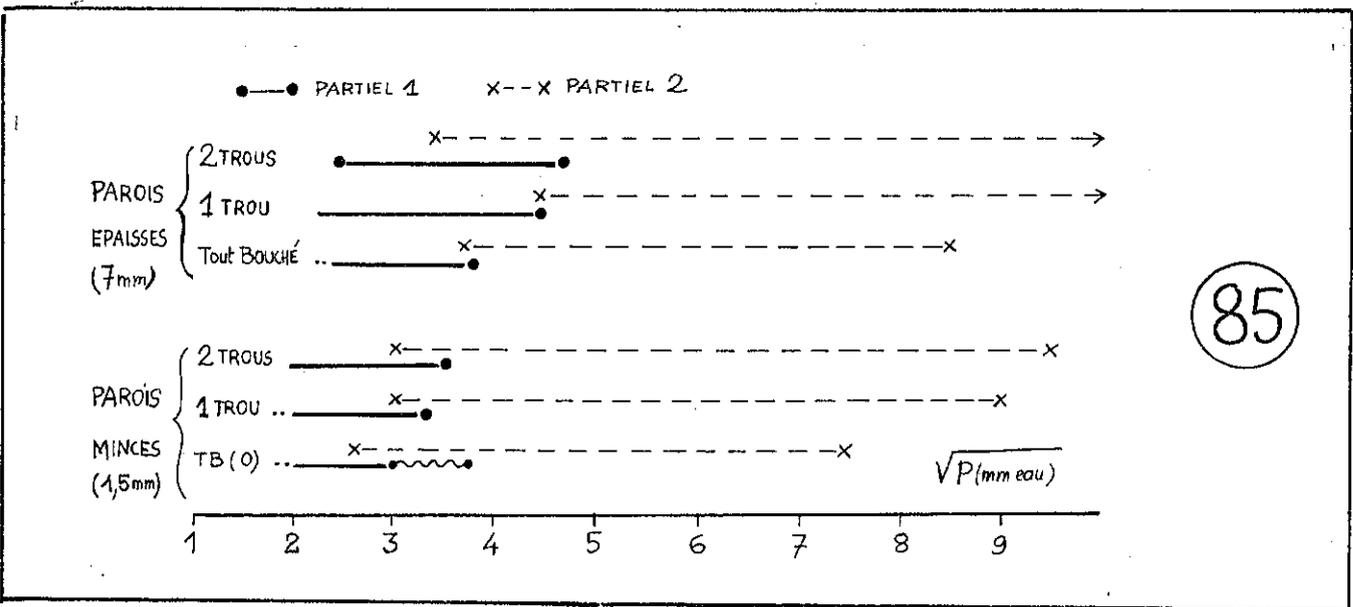
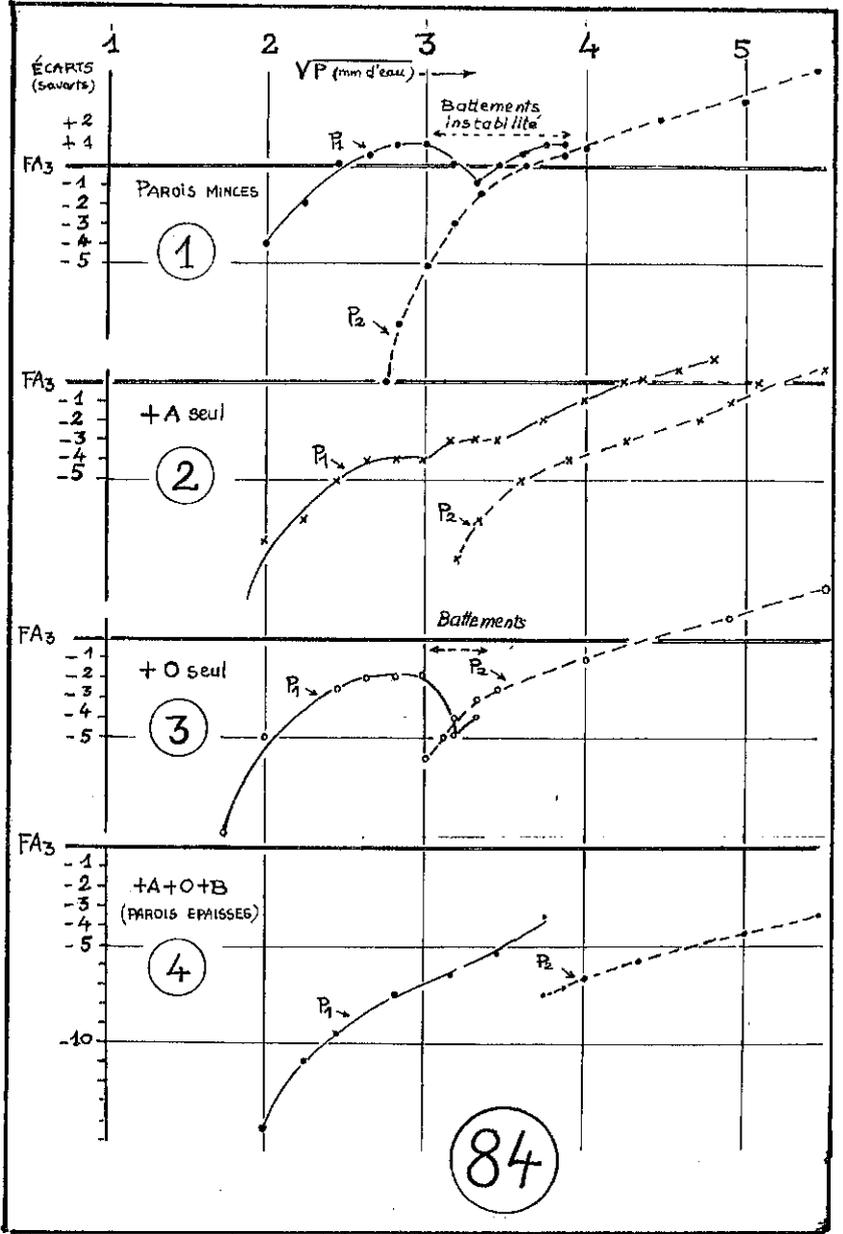
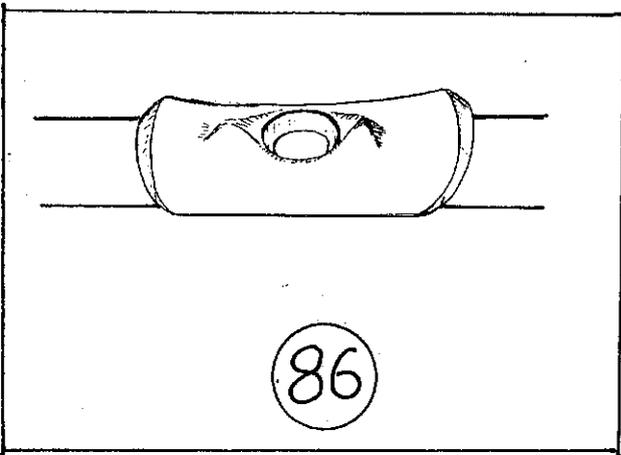
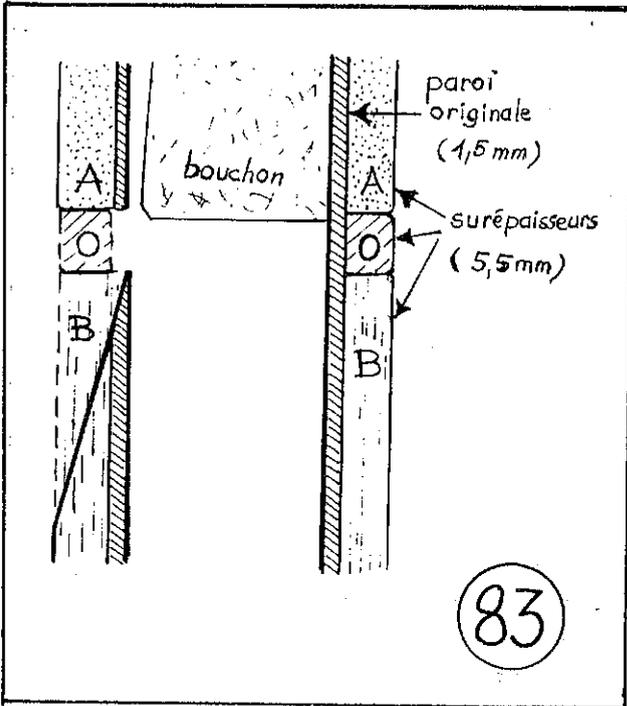
Les quatre combinaisons sont représentées l'une au dessous de l'autre. On constate tout d'abord que l'augmentation d'épaisseur des parois abaisse la fréquence des deux sons de façon à peu près régulière :

5 savarts pour A seul
 3 savarts pour O seul
 10 savarts pour A + O + B (parois épaisses).

- 1) En parois minces, la zone de stabilité du fondamental est assez réduite. En gros, de 4 à 9 mm d'eau. Au delà, sa fréquence baisse, bien que la pression continue à augmenter. Le partiel 1 est attiré par le partiel 2 voisin (à une octave près) avec lequel il produit des battements. Ce n'est que vers 16 mm d'eau que P1 disparaît tout à fait et qu'on peut produire le partiel 2 de façon stable.
- 2) Lorsqu'on augmente l'épaisseur de la paroi au bord externe de la lumière (A) on obtient un résultat comparable à celui du rouleau. La zone de stabilité du fondamental est largement étendue : jusque vers 20 mm d'eau, mais surtout, les partiels 1 et 2, bien qu'ayant une zone commune de pression assez grande, n'interfèrent pas l'un avec l'autre. Selon la façon dont on entre dans la zone commune on produit l'un des deux partiels, et celui qui existe est bien stable.
- 3) L'augmentation locale d'épaisseur au niveau des parois latérales de la bouche (O seul) n'a pas un effet très notable si ce n'est, par comparaison avec 1) une réduction de la zone d'instabilité au passage des partiels. Le partiel 2 se dégage plus tôt de la zone commune.
- 4) La bouche garnie de parois épaisses offre dans notre cas une transition franche entre les deux partiels, la zone de recouvrement en pression ayant disparu. On ne note pas d'attraction en fréquence. Ceci se traduit, lors du jeu par la possibilité d'une attaque franche, nette et, pour le fondamental une intensité plus grande qu'en 1.

Les frontières de la bouche, agissent donc simultanément sur la stabilité en fréquence des partiels et leurs rapports de fréquence. Deux partiels très voisins ont tendance à s'accorder l'un sur l'autre en fréquence. Lorsque les courbes d'évolution en fréquence se succèdent continûment (cf. § 2.27) il peut y avoir fusion, passage graduel de l'un à l'autre. Mais le plus souvent, un partiel plus fort entraîne l'autre (au détriment de sa propre stabilité) en produisant des battements plus ou moins intenses. Selon la stabilité relative des partiels et leur

...../



rapport de fréquence l'épaisseur des parois peut, ou non contribuer à une bonne indépendance des partiels, souhaitable pour la sécurité de l'attaque. Avec la même bouche, et le même tuyau, les résultats peuvent se modifier avec la fréquence. Toutefois l'expérience que nous avons faite pour les 3 premiers sons de l'instrument a montré une augmentation certaine de la stabilité en pression du fondamental avec l'épaisseur des parois. cf. Fig. 85.

§ 2.67 - Absence de parois à la flûte traversière

Dans l'embouchure de cet instrument il n'y a pas de parois latérales sur le trajet du jet d'air. Certains constructeurs ont tenté de modeler une embouchure offrant une sorte de conduit au jet d'air (cf. fig.86), mais cette tentative n'a pas eu de suite.

Les expériences précédentes portant sur le rôle du rouleau et, d'une façon générale sur l'épaisseur de la paroi externe de la lumière permettent de mieux comprendre les observations des flûtistes quand au rôle de la lèvre supérieure du musicien qui est fonctionnellement comparable à un rouleau. Plusieurs pédagogues de la flûte traversière s'accordent à dire que des lèvres trop minces sont désavantageuses car elles sont un handicap pour obtenir des sons graves intenses... Il est possible que de ce point de vue la lèvre supérieure du flûtiste joue un rôle important.

En conclusion, tout ce qui se trouve dans le domaine de la bouche peut jouer un rôle sur la forme et la direction de l'oscillation du jet donc sur le timbre du tuyau ainsi que sur la justesse des partiels. Le rouleau, connu depuis fort longtemps ou l'épaisseur de la lèvre inférieure montre une fois de plus l'importance de l'état des bords de la lumière dans la formation du son.

§ 2.68 - Conclusion à la 2ème Partie

Les trois sortes d'embouchures que nous avons étudiées se présentent bien comme des types distincts, auxquels peuvent se rattacher les autres modes d'embouchure connus.

Dans tous les cas il s'agit de créer des conditions telles qu'un jet de longueur convenable puisse osciller à une vitesse appropriée de part et d'autre de la paroi du biseau.

Nous avons vu que la bouche détermine ainsi en grande partie :

- le timbre des sons émis par l'instrument,
- le régime dans lequel fonctionne le tuyau,
- l'intensité des sons (liée au débit et à la stabilité du régime).

...../

Lorsque les paramètres de l'excitation peuvent être réglés par l'instrumentiste en cours de jeu, l'instrument gagne en possibilités : étendue plus grande du fait de l'adaptation de l'embouchure, dissociation de l'intensité et de la fréquence, mais l'étude acoustique en devient extrêmement difficile. Il est pratiquement impossible de décrire la forme du conduit précédant la lumière, la forme de celle-ci, l'état de ses bords, la position de la lumière par rapport au biseau etc... sur un flûtiste humain. Lorsqu'on tente une simulation mécanique quasi parfaite (Ando) on est conduit presque inévitablement à étudier des sons stables pour lesquels on peut définir avec précision toutes les données expérimentales mais qui n'ont plus que de lointains rapports avec l'utilisation réelle de la flûte en musique.

C'est pourquoi nous avons fait la plupart de nos expériences en utilisant des tuyaux d'orgue ou des flûtes à bec.

Si l'examen alterné de différents types d'instruments présente une succession d'expériences d'aspect quelque peu décousu, il offre par contre l'avantage de permettre des rapprochements, des recoupements utiles. L'étude des instruments dont la bouche est fixe éclaire les cas où le musicien peut tout régler. Ainsi l'analyse de certains points se présentant en termes clairs dans l'orgue (où un tuyau est construit pour un son unique) permet de mieux comprendre les problèmes posés par la construction d'une bouche fixe destinée à fonctionner sur deux octaves, (cas des flûtes à trous latéraux).

La visualisation permettrait certainement de faire de grands progrès dans la connaissance du fonctionnement de la bouche. Mais les problèmes posés par les petites dimensions des instruments usuels, la nécessité d'observer dans les trois dimensions de l'espace et de réaliser un enregistrement simultané du son ne semblent malheureusement pas solubles dans l'immédiat.

Il serait pourtant intéressant de visualiser différentes sortes d'embouchures, de décrire de façon approchée l'aspect du jet, son mouvement, les modifications entraînées par différentes actions sur la bouche, ce qui se passe au moment de l'attaque, ou du passage entre deux régimes... En fait il s'agirait, selon le vœu de BOUASSE de classer les phénomènes, décrire des allures plutôt que de faire des mesures précises valables pour un seul cas.

De telles études menées parallèlement à l'enregistrement et l'analyse de son seraient sans doute fructueuses.



3ème PARTIE

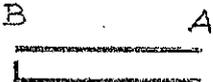
ETUDE EXPERIMENTALE DES PARAMETRES

LIES AU TUYAU



3ème PARTIEETUDE EXPERIMENTALE DES PARAMETRES
LIES AU TUYAUCHAP. I - Tuyaux cylindriques partiellement fermés
aux extrémités§ 3.01 - Généralités

La théorie élémentaire considère des tuyaux dont les extrémités sont soit ouvertes soit fermées. Or l'existence d'une bouche pour exciter le tuyau exclut ces cas théoriques : l'une des extrémités au moins est toujours partiellement ouverte seulement. Selon les conditions à l'autre extrémité, trois cas sont à considérer :

- Cas I  . Tuyau partiellement ouvert à un bout, et ouvert à l'autre (la plupart des flûtes).
- Cas II  . Tuyau partiellement ouvert à chaque extrémité (flûtes à rétrécissement inférieur)
- Cas III  . Tuyau partiellement ouvert à un bout et fermé à l'autre (bourdon, flûte de Pan) appelés ordinairement tuyaux bouchés.

Tous ces cas réels n'obéissent plus, bien entendu, aux lois élémentaires de Bernoulli, ce qui conduit à introduire dans les formules une " correction au bout " plus ou moins empirique.

Pour mettre en évidence ce qui se passe effectivement lorsqu'on ferme progressivement l'extrémité d'un tuyau nous avons fait quelques expériences.

§ 3.02 - Tuyau partiellement fermé à 1 bout et ouvert à l'autre

Soit un tuyau ($L = 350$ mm, $D = 20$ mm) ouvert aux deux bouts. Réalisons une série de plaques carrées en plexiglas, (40×40 mm) percées de trous circulaires calibrés, de diamètre d_0 , que nous mastiquons à l'une des extrémités du tuyau pour en réduire l'ouverture.

a) Excitation au moyen d'un jet :

Dirigeons un jet laminaire d'air comprimé convenablement orienté sur le bord du trou de la plaque : le tuyau parle. La fréquence du fondamental et des partiels varie évidemment avec la pression d'air du réservoir. On relève alors le champ de liberté de chaque partiel, pour les différents diamètres du trou.

Ce mode d'excitation présente plusieurs inconvénients : pour obtenir au mieux un partiel donné il faut adapter la direction du jet et sa distance à l'arête : ce qui entraîne nécessairement des modifications de pression, donc de fréquence. D'autre part, le partiel 1 ne sort que très difficilement pour les très petits trous (diamètre inférieur à 3 mm).

b) Excitation par résonance :

Devant ces difficultés nous avons recommencé la même série d'expériences mais en excitant le tuyau au moyen d'un haut-parleur. Nous comparons les résultats obtenus au moyen des deux types d'excitation à propos du cas II (fig.5).

BOUASSE a traité précédemment (Bib. (2) § 37 à 51) le problème de la fermeture partielle d'un tuyau cylindrique; comparons nos résultats avec les siens.

Posons :

- N fréquence du partiel pour un trou de diamètre d
- N_0 fréquence du même partiel quand $d = 0$ (tuyau bouché)
- $\delta = d/D$, rapport du diamètre du trou au diamètre du tuyau.
- L/D rapport de la longueur du tuyau à son diamètre, ou " taille " du tuyau.

Le paramètre β étudié par BOUASSE est fonction de δ et de la taille

$$\beta = \frac{4\delta L}{\pi D}$$

Portons sur un graphique les variations de β en fonction du rapport N/N_0 .

fig.1

On voit, fig.1 les courbes des partiels 1 et 2 pour les deux types d'excitation (jet et résonance) ainsi que les courbes calculées "après BOUASSE. Cette figure appelle les remarques suivantes :

- Les points expérimentaux obtenus dans l'excitation par jet tangentiel donnent des courbes peu régulières pour les raisons que nous avons précisées plus haut.
- La courbe théorique donnée par BOUASSE se situe nettement en dehors des résultats expérimentaux, surtout pour les faibles valeurs de β .
- L'inflexion des courbes au voisinage de l'origine (signalée par BOUASSE) pourrait bien signifier un changement de régime.

Les résultats concordent grossièrement avec la théorie, avec toutefois quelques réserves :

Reprenons l'expérience avec un tuyau plus long ($L = 570$ mm) de même diamètre que le précédent, et des plaques ayant deux épaisseurs différentes ($\varepsilon = 2$ mm et $\varepsilon = 5$ mm).

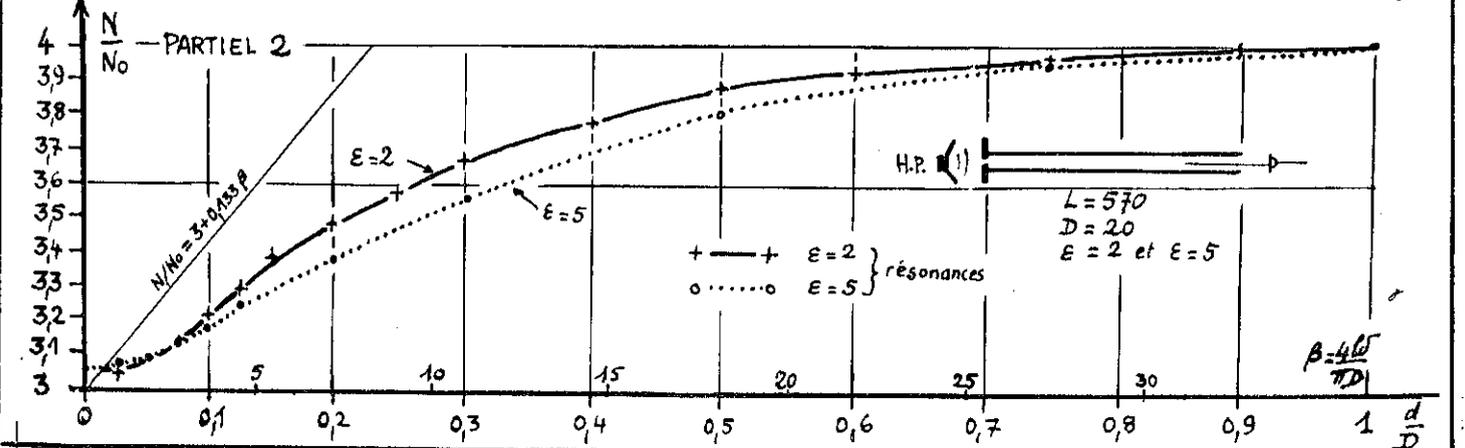
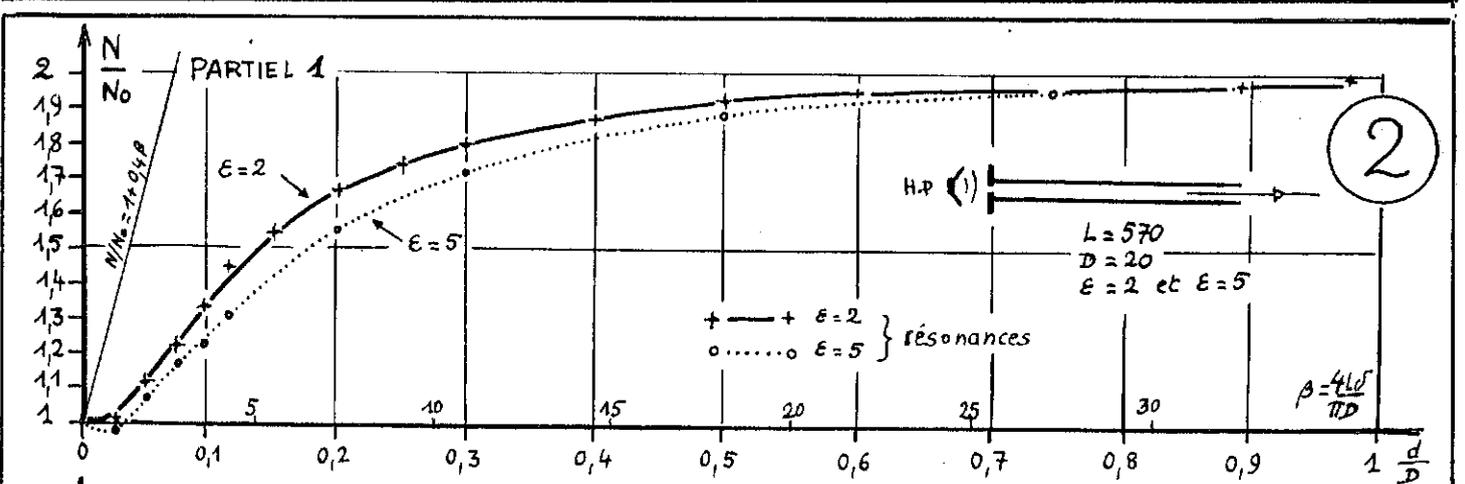
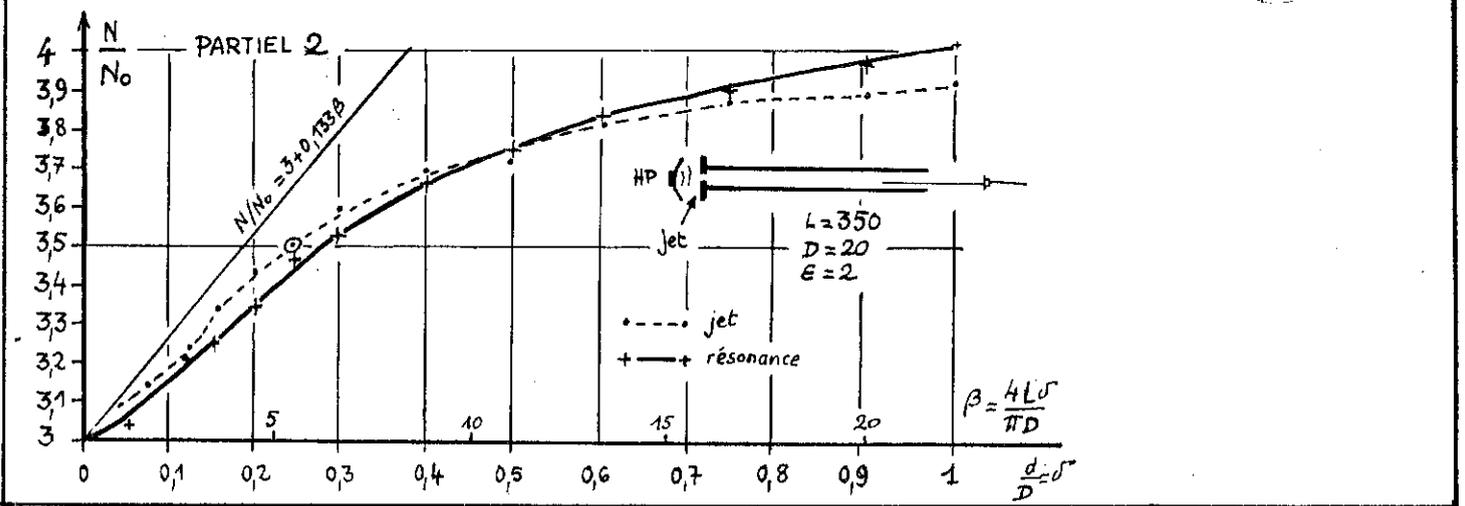
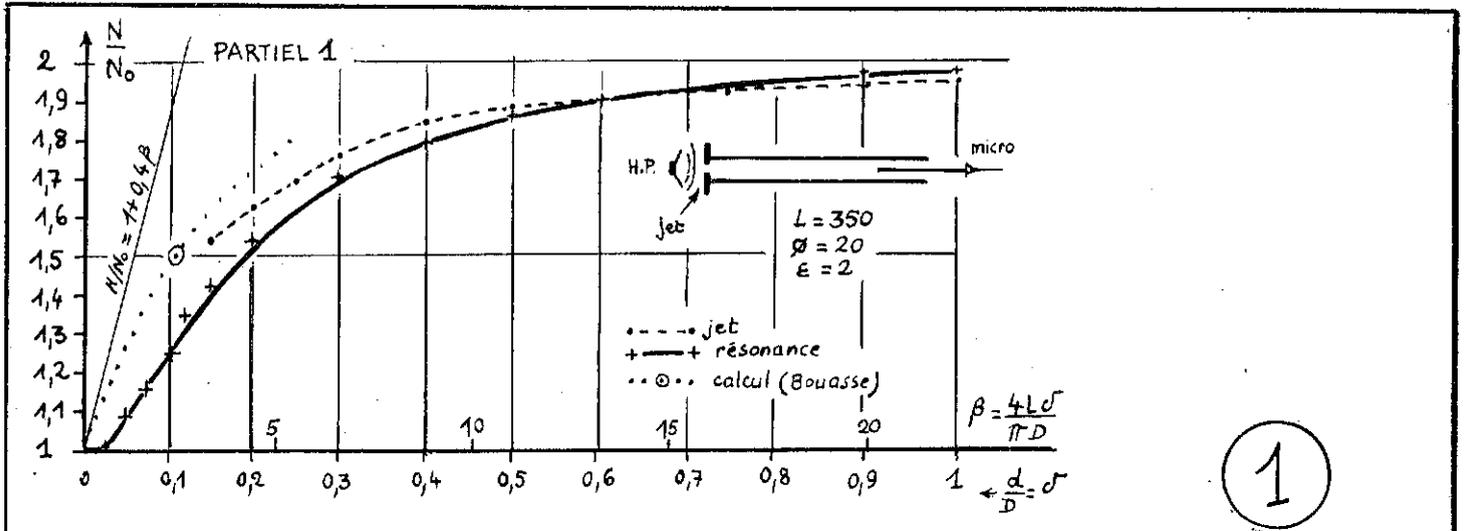
Toutes choses égales par ailleurs, on vérifie que la fréquence baisse quand l'épaisseur de la plaque augmente, ce que l'on pouvait prévoir puisque l'on constitue ainsi une cheminée. Il faudrait donc introduire ce nouveau paramètre dans la formule (fig.2).

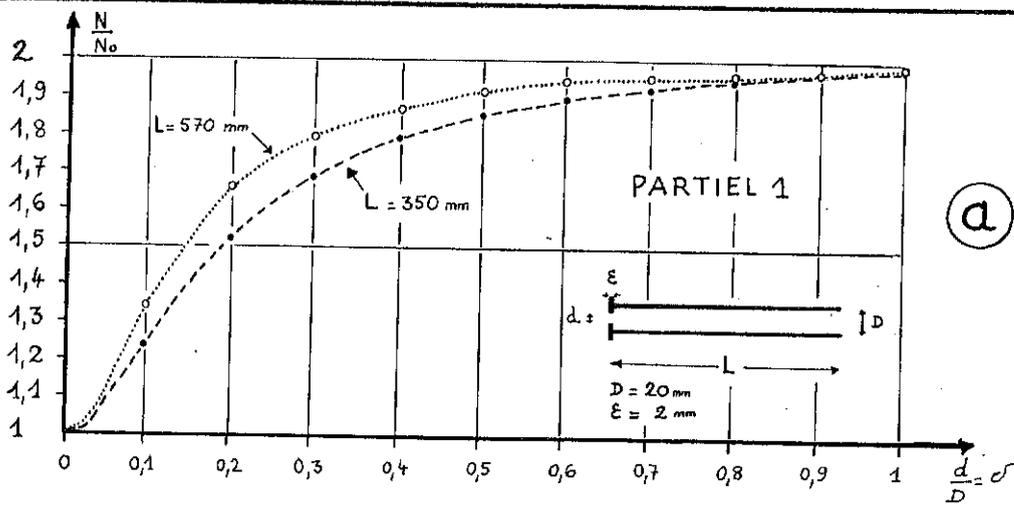
fig.2

Comparons maintenant les résultats obtenus pour 2 longueurs différentes du tuyau. Pour cela portons $\delta = d/D$ en abscisse (fig.3). Les courbes mettent en évidence le rôle de la taille : pour une valeur donnée de δ , la fréquence du partiel considéré est abaissée d'une plus grande quantité avec le tuyau le plus court.

fig.3

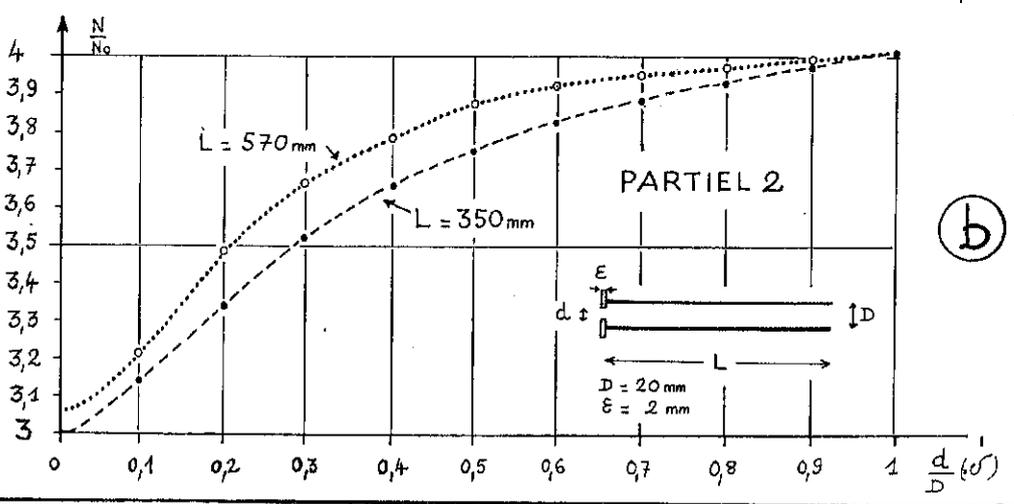
...../





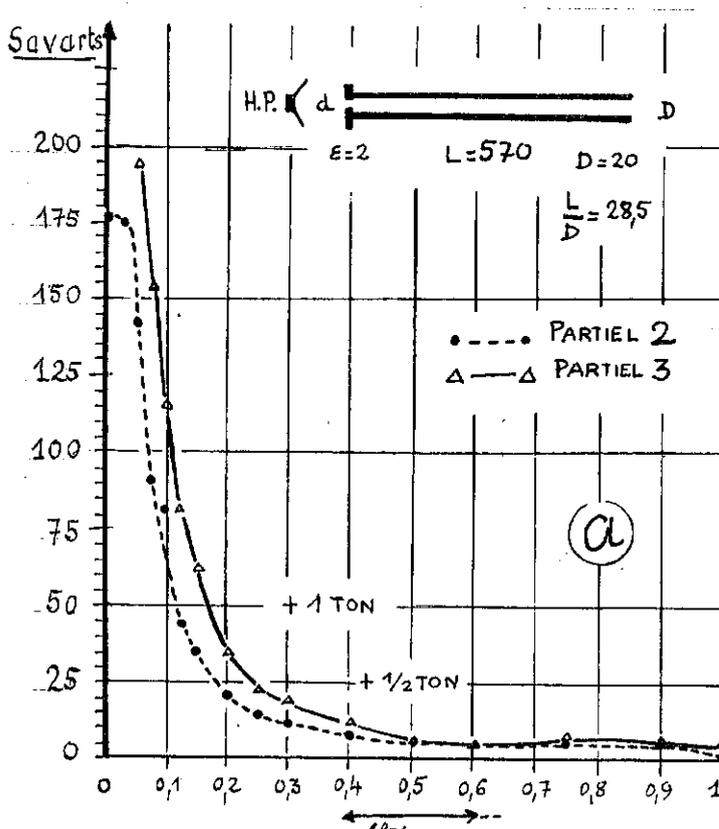
(a)

← (3)

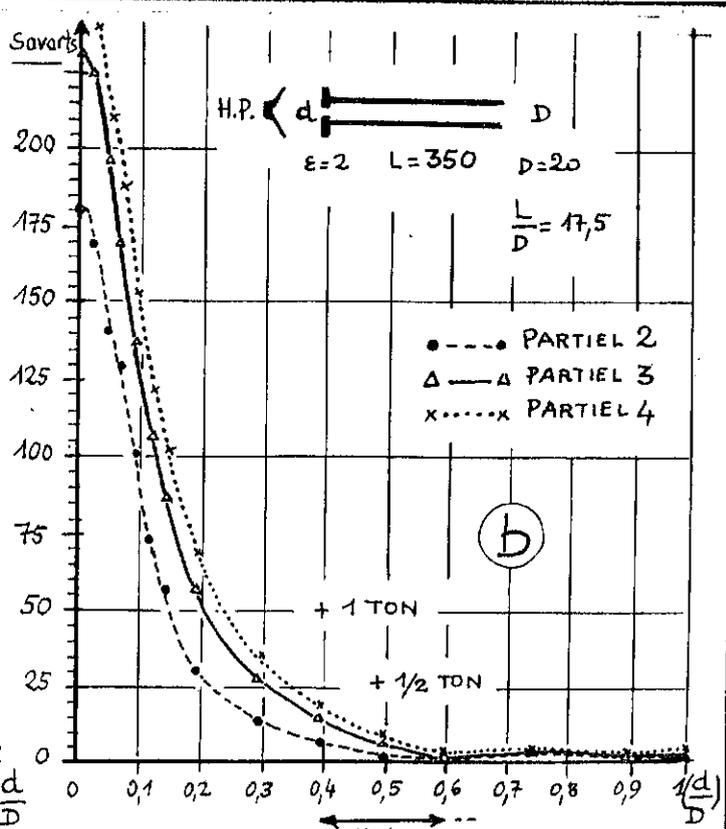


(b)

(4) ↓



(a)



(b)

Pour chaque partiel on a porté l'intervalle (en savarts) qu'il fait avec l'harmonique de même numéro du partiel 1 pris ici comme référence.

fig.4a Nous pouvons dès à présent tirer quelques conclusions concernant la justesse des partiels des tuyaux à bouche. Pour cela portons sur la figure 4a la " fausseté des partiels " par rapport au fondamental, en fonction du rapport d/D . On prend comme référence les harmoniques du partiel 1.

Tant que d/D est supérieur à 0,5 la fausseté ne dépasse guère 7 à 8 savarts et peut être négligée, le champ de liberté en fréquence représentant des fluctuations bien supérieures. Mais si d continue à diminuer ($d/D < 0,5$) la fausseté s'accroît rapidement et d'autant plus que le partiel est de rang plus élevé.

pour $d/D = 0,25$ { P3 est plus haut d'1/2 ton que H3 du partiel 1
 pour $d/D = 0,17$ { P2 est plus haut d'1/2 ton que H2 du partiel 1
 { P3 est plus haut d'1 ton que H3 du partiel 1

fig.4b

Quand le rapport L/D diminue (figure 4b) la fausseté est plus considérable.

En fait, l'abaissement dû à la fermeture partielle de l'extrémité diminue avec le rang du partiel. Donc le partiel 1 ou fondamental est plus abaissé que les autres; mais, du point de vue musical, où il est d'usage de juger la justesse à partir du partiel 1 (pris comme référence), il est légitime de dire que les autres partiels sont trop aigus.

Très grossièrement, si l'on assimile un tuyau à bouche à un tuyau partiellement fermé, on peut, en calculant la surface de la bouche trouver d/D dans certains cas réels. En facture d'orgue où les proportions de la bouche sont en rapport avec la longueur du tuyau et sa taille, voici quelques valeurs relevées sur des tuyaux de 1 pied (mensurations de M. MEYER-SIAT, orgue de Mollau).

On trouve :	Montre	8'	$d/D = 0,49$
	Prestant	4'	$d/D = 0,51$
	Flûte	4'	$d/D = 0,43$
	Gambé	8'	$d/D = 0,55$

On peut remarquer que ces valeurs sont dans la zone optimale $0,40 < d/D < 0,55$.

Pour fonctionner convenablement, un tuyau ouvert doit être partiellement fermé à l'embochure. Plus la surface relative de la bouche est grande, plus les partiels sont justes; mais il devient difficile de bien faire parler le tuyau. Inversement, quand la bouche est trop petite, les partiels deviennent faux. On tend alors vers un timbre " flûté " que l'on peut rechercher systématiquement; mais au delà d'une certaine limite, le tuyau ne fonctionne plus très bien et le son est de faible intensité.

On ne peut évidemment pas aller très loin dans ce genre de considérations car nous savons bien, qu'à surfaces égales, des bouches de géométries différentes ne donnent pas les mêmes résultats.

§ 3.03 - Tuyau partiellement fermé à chaque bout

Prenons un tuyau à bouche, donc comportant une ouverture fixe à une extrémité (d') et relevons les fréquences des partiels pour différents degrés de fermeture de l'autre extrémité (d).

En raison des incidences pratiques, ce cas nous intéresse tout particulièrement :

- Nous pouvons expérimenter en utilisant le système d'excitation normale du tuyau (pipeau). Les résultats sont alors intéressants à comparer avec ceux obtenus par

...../

résonance en excitant au moyen d'un haut-parleur.

- Ce cas se rencontre fréquemment dans la réalité instrumentale : il s'agit des flûtes munies d'un rétrécissement terminal (kena, flûte à bec hongroise...). Du point de vue théorique c'est en fait un cas particulier de discontinuité dans la section droite d'un tuyau (cf. § 3.35).

Pour l'expérience nous avons utilisé un pipeau muni de son embouchure (bouche 4 x 6 mm, D = 20 mm, L = 350 mm) et les plaques précédentes percées de trous calibrés (épaisseur 2 et 5 mm).

fig.5

Sur la figure 5 nous avons porté la variation de fréquence (en savarts) avec le diamètre du trou, l'instrument étant excité normalement. Les 3 premiers partiels sont superposés; il faut, pour chacun d'eux se rapporter à une ordonnée différente :

P1 varie de SOL 2 à SOL 3

P2 varie de RE#4 + 10 savarts à SOL#4

P3 varie de DO 5 + 15 savarts à RE#5

Le diagramme obtenu en excitant le tuyau avec un haut-parleur correspond, à -10 ou -15 savarts près, à la limite supérieure du champ de liberté en fréquence obtenu par jet d'air, ce qui confirme les observations de J. MEYER (1) p.48 et L. RAYLEIGH (T.II p. 219).

Dans la pratique on ménage un rétrécissement à l'extrémité inférieure d'un tuyau lorsqu'on veut abaisser le fondamental d'un tuyau de longueur donnée. Il s'agit souvent d'instruments en roseau ou en bambou dont on coupe l'extrémité inférieure au niveau d'un noeud, que l'on perce incomplètement.

Il faut maintenir le trou relativement petit si l'on veut que l'abaissement soit conséquent, sauf si la " bague " ainsi réalisée est suffisamment épaisse.

Les partiels étant superposés sur la figure, nous pouvons étudier leur justesse :

- Tant que le rapport d/D reste supérieur à $1/3$, les partiels sont abaissés tout en conservant leurs rapports relatifs. L'instrument baisse, mais reste juste. Ces partiels sont plus hauts que les harmoniques du fondamental puisque le tuyau est partiellement fermé à la bouche.

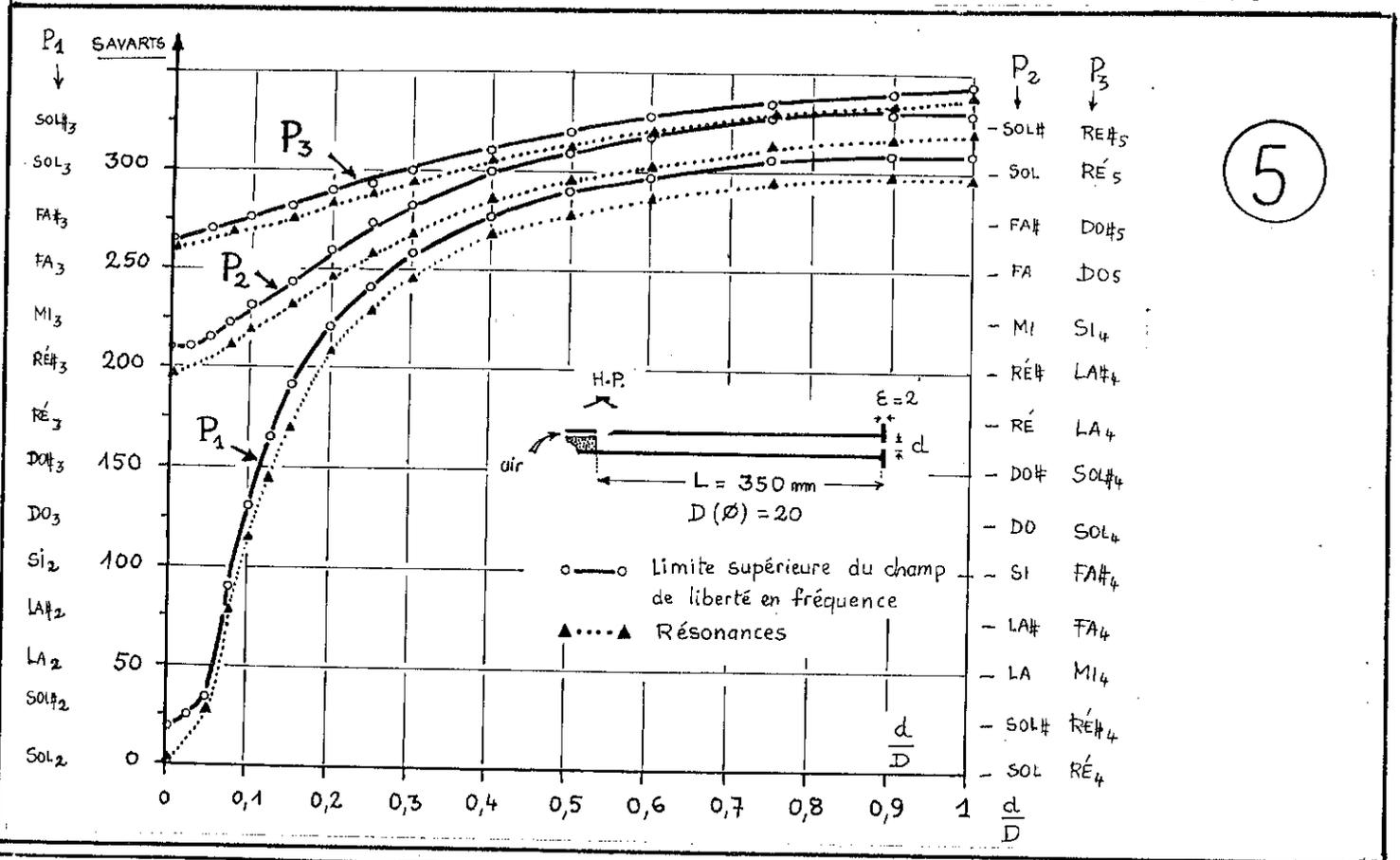
- Quand d/D diminue au delà de $1/3$, l'abaissement croît plus rapidement pour les partiels inférieurs; la fausseté de l'instrument augmente.

Du point de vue musical on se trouve donc devant un choix à faire : ou bien on veut que le fondamental soit abaissé d'une grande quantité (une 4te par ex.), quitte à sacrifier la possibilité d'octavier et de quinter juste; ou bien on tient à la justesse des partiels, mais alors on est limité pour abaisser le fondamental.

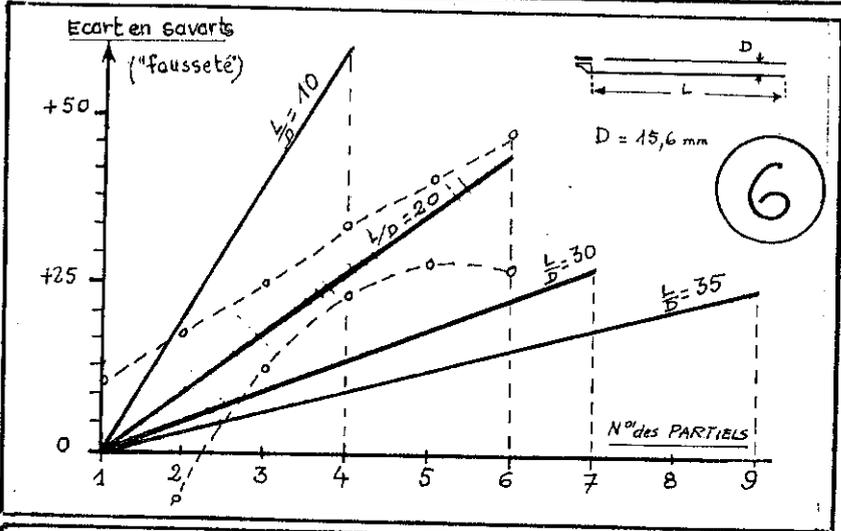
Les flûtes que nous avons examinées relèvent apparemment du 2ème choix : l'abaissement ne dépasse guère un ton.

§ 3.04 - Tuyau fermé à un bout, partiellement fermé à l'autre

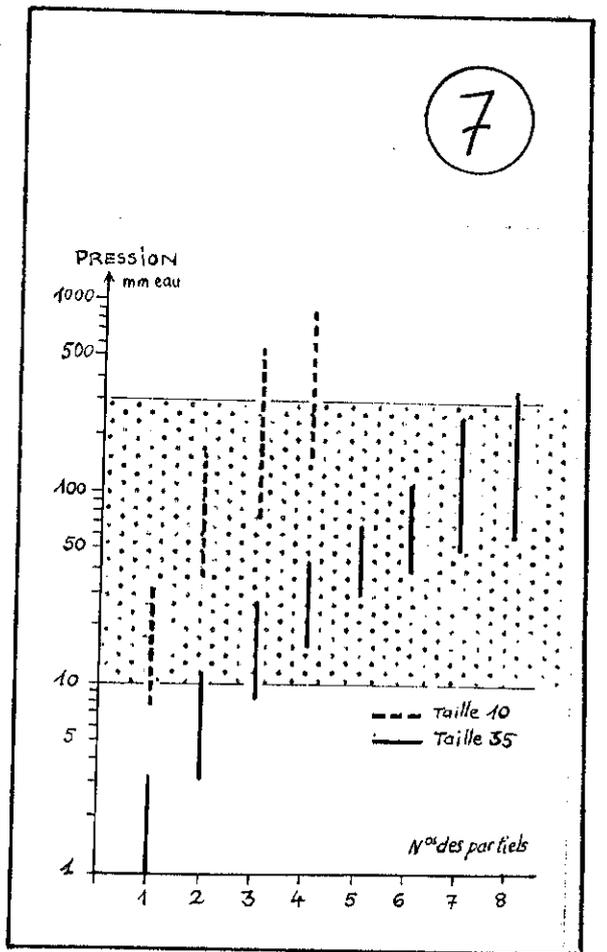
Contrairement aux tuyaux ouverts aux deux bouts il est relativement aisé d'exciter à plein brifrice un bourdon. Toutefois dans la pratique courante l'ouverture est partiellement fermée à l'excitation soit pour former une bouche (bourdon d'orgue,



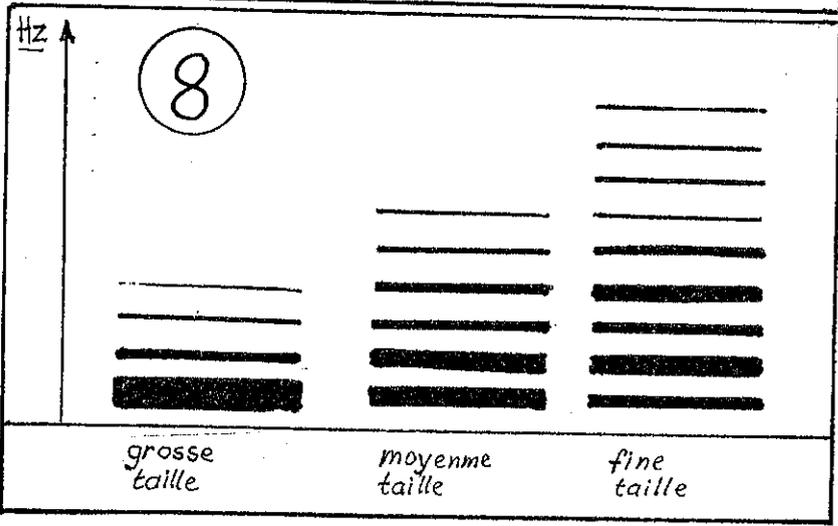
5



6



7



8

jazzoflûte) soit parce que le musicien recouvre en partie l'orifice du tuyau par sa lèvre supérieure (cf. fig.34 PL, 16). Le rapport d/D calculé pour les UT des bourdons de 16' et 8' du grand-orgue de Mollau (Cf MEYER-SIAT p.27) donne des valeurs comparables à celles des tuyaux ouverts. On a en moyenne $d/D = 0,5$ pour les bourdons rectangulaires et 0,55 pour les bourdons cylindriques.

Comme pour les cas précédents le recouvrement abaisse tous les partiels d'une même quantité en fréquence donc d'un intervalle musical d'autant plus faible que le partiel est de rang élevé. Par rapport au partiel 1, les autres sont donc trop hauts.

BOUASSE expose la théorie du bourdon partiellement fermé à l'autre bout au § 38 de " Tuyaux et résonateurs ".

Schématiquement, lorsqu'on passe d'un bourdon ouvert à un bout de fréquence N , à un tuyau fermé aux deux bouts de même longueur, la série des partiels s'écrit :

	1	2	3	4	N° du partiel
bourdon de fréquence N	N	$3N$	$5N$	$7N$	etc...
Tuyau fermé aux deux bouts, de même longueur	0	$2N$	$4N$	$6N$	etc...

Par définition les tuyaux bouchés n'ont pas de trous latéraux et on n'emploie pratiquement jamais les partiels supérieurs. Un bourdon est construit pour une note fondamentale (variable en fréquence dans le cas du jazzoflûte). L'inharmonicité des partiels affectera donc surtout le timbre du tuyau.

Dans le jeu de la flûte de Pan la variation de ^{la} fermeture partielle à la bouche est un élément important du jeu de l'instrument, pour modifier la fréquence du fondamental et réaliser divers effets mélodiques (portando, glissando, vibrato) sur un intervalle qui peut aller jusqu'à une quarte pour un même tuyau.

Chap. II - ROLE DE LA TAILLE

§ 3.05 - Définition

La taille d'un tuyau est un terme emprunté au vocabulaire des organiers. Il désigne pour nous le rapport des deux dimensions caractéristiques d'un tuyau, la longueur et le diamètre : $\text{taille} = L/D$. Plus ce rapport est grand, plus la taille est fine et vice versa.

Les facteurs d'orgue classent schématiquement les tuyaux à bouche en

- tuyaux de grosse taille (flûtes),
- tuyaux de taille moyenne (principaux),
- tuyaux de taille menue (gambes)

La taille des tuyaux d'un jeu donné se modifie selon la tessiture mais les trois familles restent bien distinctes. Les dimensions des bouches sont en rapport avec la taille; il en résulte des caractéristiques de timbre propres à chaque catégorie, accentuées par le fait que l'harmonisation est aussi réalisée différemment selon la taille.

Il est donc intéressant de connaître les modifications entraînées par des changements de taille d'un tuyau à bouche.

§ 3.06 - Taille et justesse des partiels. Expérience.

Nous savons que pour un tuyau de longueur donnée la fausseté des partiels croît avec :

- le diamètre du tuyau
- le rang du partiel
- le degré de fermeture à la bouche.

Les interactions entre ces divers facteurs sont assez complexes, et il n'est pas possible, actuellement de donner une formule satisfaisante pour calculer la fausseté des partiels d'un tuyau à bouche. Mais pour fixer les idées, nous avons pensé intéressant de faire l'expérience suivante.

Soit un tuyau cylindrique ($L = 544$ mm, $D = 15,6$ mm) muni d'une embouchure de flûte à bec. On se propose de recouper graduellement le tuyau, et pour chaque nouvelle longueur, de relever les champs de liberté en fréquence des partiels.

- a) En schématisant le champ de liberté et en portant, pour 4 longueurs différentes du tuyau, la justesse relative des partiels nous avons obtenu le diagramme suivant : fig.6.

fig.6

On voit que plus on raccourcit le tuyau, donc plus la taille augmente, et plus la pente de la droite représentant l'écart des partiels par rapport aux harmoniques du partiel 1 augmente aussi.

Pour $L/D > 30$ (taille fine), l'écart de justesse du partiel 2, utilisé dans la plupart des flûtes*, ne dépasse pas 5 savarts, limite que l'on peut tolérer, compte tenu des fluctuations de la fréquence avec la pression.

* Noter que la famille des flûtes en orgue, désigne des tuyaux de grosse taille, alors que dans la facture des flûtes à trois latéraux une taille fine est recherchée.!

Pour $L/D = 20$ (taille moyenne), l'écart est de 9 savarts. L'octave paraîtra nettement trop grande.

Pour $L/D = 10$ (grosse taille), le partiel 2 n'est plus utilisable pour jouer l'octave, il est presque 1/2 ton trop haut (écart de 21 savarts).

- b) L'expérience montre également que le nombre de partiels qu'il est possible d'obtenir d'un tuyau, en augmentant le souffle, croît avec le rapport L/D . Quand la taille passe de 10 à 35 le nombre des partiels possible passe de 4 à 9 sur la figure. C'est pourquoi toutes les flûtes qui utilisent un grand nombre de partiels ont une taille très fine.

Ex. le Ney Turco-arabe $L/D \approx 35$ et le galoubet $L/D = 37$.

Les tailles fines offrent donc un double avantage : des partiels plus justes et plus nombreux. En contrepartie, les partiels de rang inférieur sont souvent difficiles à émettre et de faible intensité. L'expérience suivante va nous en donner la raison.

§ 3.07 - Taille et champ de liberté en pression des partiels

fig.7

Au cours de la même expérience nous avons relevé, pour chaque partiel, les pressions limites de passage au partiel supérieur (par pression croissante) et au partiel inférieur (par pression décroissante). On obtient ainsi un champ de liberté des pressions qui définit les zones d'existence des partiels. Sur la figure 7 on voit ce champ de liberté pour 2 longueurs du tuyau correspondant à une taille très fine (35) et à une grosse taille (10).

On a représenté aussi la zone couvrant les pressions utilisables dans la pratique : de 10 à 300 mm environ. Les partiels 1 et 2 de la taille fine sont en dehors de cette zone. On peut, dans une certaine mesure modifier les pressions limites de passage d'un régime à l'autre en agissant sur les caractéristiques de la bouche comme nous l'avons vu dans la 2ème partie (§ 2.65), mais il faut pour cela que la bouche soit réglée. Précisons que les pressions limites de passage varient en raison inverse du rapport L/D . En coordonnées logarithmiques les points expérimentaux se placent sur des quasi-droites.

§ 3.08 - Taille et timbre

Le nombre et l'intensité relative des harmoniques du son fondamental d'un tuyau sont liés directement à la taille de celui-ci. La justesse des partiels conditionne leur intensité, mais seulement dans une certaine limite, car pour les tailles très fines nous avons vu que les régimes inférieurs deviennent plus difficiles à produire.

Si l'on se réfère aux 3 familles de tailles couramment employées en orgue on aura le schéma harmonique de la figure 8.

- Grosse taille : type jeux de flûte. Le fondamental est de loin le plus intense. Les harmoniques sont peu nombreux.
- Taille moyenne : type prestant. On a facilement une dizaine d'harmoniques; les deux premiers sont prédominants.
- Taille menue : type gambe. 10 à 15 harmoniques; le fondamental est souvent faible et d'établissement difficile. Le tuyau a tendance à octavier.

...../

On peut, bien entendu modifier assez sensiblement le timbre d'un tuyau de taille donnée en agissant sur l'excitation (harmonisation) en particulier pour la balance d'intensité des harmoniques 1 et 2, mais le caractère d'ensemble d'un jeu d'orgue est tout de même largement déterminé par la taille choisie

Chap. III - ROLE DES TROUS LATÉRAUX

§ 3.09 - Généralités

A part quelques exceptions comme l'orgue, la tulinca roumaine et les flûtes de Pan, la grande majorité des instruments à embouchure de flûte possède des trous latéraux destinés à modifier les fréquences émises par le tuyau. Le choix de l'emplacement ou du diamètre des trous d'une flûte ne pose pas trop de problèmes si on se contente d'utiliser les sons du régime 1 obtenus en découvrant progressivement les trous du grave à l'aigu comme c'est le cas par exemple, pour le pipeau des enfants. Mais dans un grand nombre d'instruments, pour augmenter l'étendue, on emploie également les régimes 2 et 3 qui doivent être à l'octave et à la douzième justes du fondamental. Enfin les possibilités d'un instrument sont encore accrues par l'utilisation de " fourches " (recouvrement de certains trous inférieurs). La combinatoire de hauteurs et de timbres ainsi réalisés est énorme, mais il est exclu à l'heure actuelle de prévoir par le calcul la place et le diamètre des trous, si l'on veut tenir compte de tous les impératifs en présence, et si, de plus on veut satisfaire parallèlement certaines exigences d'homogénéité de timbre pour tous les sons de l'instrument.

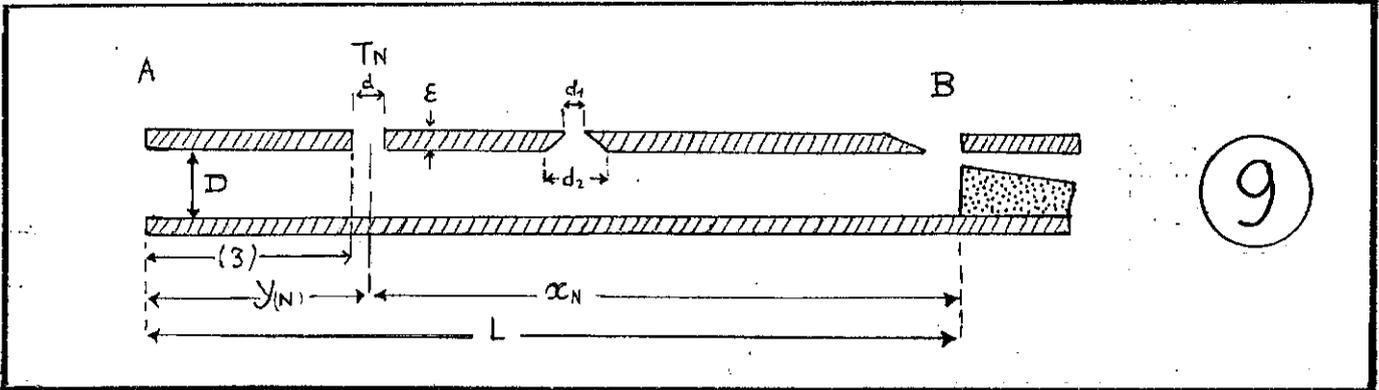
fig.9

Les variables en présence sont : fig. 9 :

- la place du trou déterminée par la distance x_n du centre du trou à l'embouchure B (fond, bouchon) ou la distance complémentaire y_n du centre du trou à l'extrémité A du tuyau.
- le diamètre d du trou lorsqu'il est circulaire, ou le diamètre d'un cercle de surface équivalente lorsque le trou a une forme quelconque;
- la hauteur ε de la cheminée du trou ménagée dans l'épaisseur de la paroi.

Dans la plupart des cas les trous sont alignés sur une seule génératrice du tuyau, celle qui passe par le milieu de la bouche ou celle qui lui est diamétralement opposée. Il semble que ce soit essentiellement pour des raisons d'ordre pratique et esthétique que l'on procède ainsi. L'expérience ne révèle aucune variation de fréquence lorsqu'on imprime un mouvement de rotation à la portion de tuyau qui porte un trou latéral. Par contre on constate de sensibles modifications dans le timbre et l'intensité du son rayonné par l'instrument. Les trous latéraux sont des sources sonores de caractéristiques variables avec la fréquence.

...../



9

Etat des trous	PARTIEL 1	PARTIEL 2	PARTIEL 3	PARTIEL 4	PARTIEL 5
TOUT BOUCHE					
a)	FA ₃ + 4	FA ₄ + 6	DO ₅ + 5	FA ₅ + 10	LA ₅ + 7
b)	+ 4	+ 5	+ 5	+ 11	+ 8
c) agrandi	+ 4	+ 5	+ 4	+ 9	+ 8
1 TROU OUVERT					
a)	SOL ₃ + 6	SOL ₄ + 5	RE ₅ + 1	SOL ₅ - 9	SI ₅ - 5
b)	+ 14	+ 12	+ 10	+ 2	ne sort pas
c) agrandi	+ 14	+ 14	+ 12	+ 3	ne sort pas
2 TROUS OUVERTS					
a)	LA ₃ + 2	LA ₄ + 1	MI ₅ - 5	LA ₅ - 4	DO ₆ + 3
b)	+ 9	+ 11	+ 8	+ 1	+ 8
c) agrandi	+ 9	+ 11	+ 9	+ 2	+ 9

10

SAVARTS

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
	FA ₄	FA ₅	SOL ₅	DO ₆	SOL ₃	SOL ₄	RE ₅	SOL ₅	MI ₆
+ 20									
+ 10									
0									
- 10									
- 20									

S = 150 mm² TROU ROND d = 13,8 mm
 S = 150 mm² TROU RECTANG^{re} d = 30 mm
 champ de liberte en frequence
 champ de liberte en frequence

11

1) FORME DES TROUS

fig.9

Il faudrait faire intervenir aussi le profil des trous dans la paroi. Ainsi, dans de nombreuses flûtes à bec ou traversières du 18^e siècle, les trous sont de diamètres très petits sur la surface extérieure de l'instrument, mais en examinant l'intérieur on remarque qu'ils sont agrandis parfois considérablement, ce qui modifie à la fois la justesse et le timbre du son de l'instrument (fig.9). On retrouve en particulier le problème de l'agrandissement local de la perce d'un tuyau.

§ 3.10 - Rôle de la cheminée du trou sur la fréquence des partiels

Dans le calcul des fréquences de résonance des flûtes, NEDERVEEN (1) prend comme diamètre, pour les trous agrandis intérieurement, le diamètre extérieur apparent. Pour voir ce qu'il en était nous avons fait l'expérience suivante.

fig.10

Nous utilisons un tuyau cylindrique de parois assez épaisses, muni d'une embouchure de flûte à bec (dimensions sur la fig.10). Perçons tout d'abord deux trous ronds, T1 et T2. Excitons le tuyau avec de l'air comprimé, stable, et relevons pour certaines valeurs fixes de la pression, les fréquences des cinq premiers partiels dans les trois cas suivants :

- tous les trous bouchés (sur la face extérieure du tuyau)
- le trou T1 seul ouvert,
- les trous T1 et T2 ouverts.

A présent rebouchons totalement ces deux trous en les remplissant de pâte à modeler jusqu'au niveau de la paroi interne du tuyau, et perçons deux autres trous T'1 et T'2, de mêmes dimensions, diamétralement opposés aux deux premiers. Puis agrandissons ces trous à l'intérieur, de façon à obtenir le profil dessiné sur la figure, et relevons les fréquences des partiels dans les mêmes conditions que précédemment.

Portons les résultats sur un tableau (fig.10). Pour chaque partiel nous avons noté l'écart en savarts par rapport à la note correspondante de la gamme tempérée de référence (base LA 3 = 440 Hz).

Tout bouché, les résultats sont comparables, aux erreurs d'expérience près. L'agrandissement local du tuyau dû aux cavités du deuxième type de trou ne semble donc pas jouer de rôle notable sur la fréquence des partiels.

En ouvrant un puis deux trous, on constate par contre des différences très sensibles. Les fréquences de partiels sont plus élevées lorsqu'on débouche les trous T'1 et T'2; les écarts vont de 7 à 10 savarts. A surface extérieure égale, les trous agrandis intérieurement sont donc plus efficaces. Peut-on les assimiler à des trous de diamètre extérieur réel plus grand ?

Reprenons le tuyau et, ayant totalement rebouché T'1 et T'2, agrandissons graduellement les trous T1 et T2 jusqu'à obtenir, pour le partiel 1, les mêmes fréquences que celles que nous avions pour les trous agrandis intérieurement. On note aussi de bonnes concordances pour les autres partiels.

En bref, le fait d'agrandir les trous à l'intérieur du tuyau diminue la résistance du trou : on obtient pratiquement les mêmes effets que si le trou était plus grand. Dans notre expérience il a fallu porter le diamètre des trous T1 et T2 de 5 à 7 mm pour avoir des résultats comparables avec ceux des trous agrandis intérieurement.

On comprend donc l'intérêt de cette pratique en facture instrumentale, pour

...../

les instruments dépourvus de mécanique. Le fait d'agrandir les trous intérieurement combine heureusement deux avantages :

- ceux des petits trous en ce qui concerne le jeu. En effet, il est plus facile de boucher sûrement et rapidement des trous de petit diamètre (5 à 6 mm)

- et ceux des grands trous, en ce qui concerne l'efficacité, l'intensité et la justesse des partiels.

L'incidence de cette forme particulière de trou sur la hauteur nous semble suffisamment notable pour que l'on en tienne compte dans le calcul.

Au cours de cette expérience nous avons également enregistré l'instrument en débouchant les différents types de trous. Les analyses que nous avons faites ne nous ont pas permis de mettre en évidence une modification du timbre produite par la forme particulière du trou. Mais il est possible que sur un instrument réel comportant 6 ou 8 trous agrandis intérieurement l'effet cumulatif des cavités dues aux trous joue un rôle important sur le timbre, comme nous l'a confirmé un facteur contemporain (D. BARIAUX). L'expérience reste à faire.

§ 3.11 - Trou rond et trou rectangulaire de même section

fig.11

Sur la paroi latérale d'un pipeau cylindrique (dimensions sur la fig.11) nous avons percé 2 trous de même surface, diamétralement opposés, l'un rectangulaire, l'autre rond; leurs milieux respectifs sont à la même distance de la bouche (x).

Les champs de liberté en fréquence des 4 premiers partiels pour 2 positions différentes des trous montrent une bonne concordance. On remarque toutefois que les partiels émis lorsqu'on débouche le trou rond sont légèrement plus bas (3 à 4 savarts) que ceux du trou rectangulaire. En toute rigueur, il faudrait donc faire une correction: le centre d'un trou rectangulaire se situe apparemment un peu plus haut que celui du trou rond correspondant, si on désire une équivalence acoustique.

L'analyse du son du tuyau enregistré en disposant le trou de la même façon par rapport au microphone, ne permet pas de déceler des différences notables entre trou rond et trou rectangulaire.

fig.12

On vérifie en effet que les résultats sont tout à fait similaires, aussi bien pour la partie stable du son tenu que pour l'attaque (cf. fig.12). Dans les conditions particulières de notre travail il est donc légitime d'admettre que les phénomènes étudiés avec des flûtes à trous rectangulaires sont transposables sur des flûtes ayant des trous ronds.

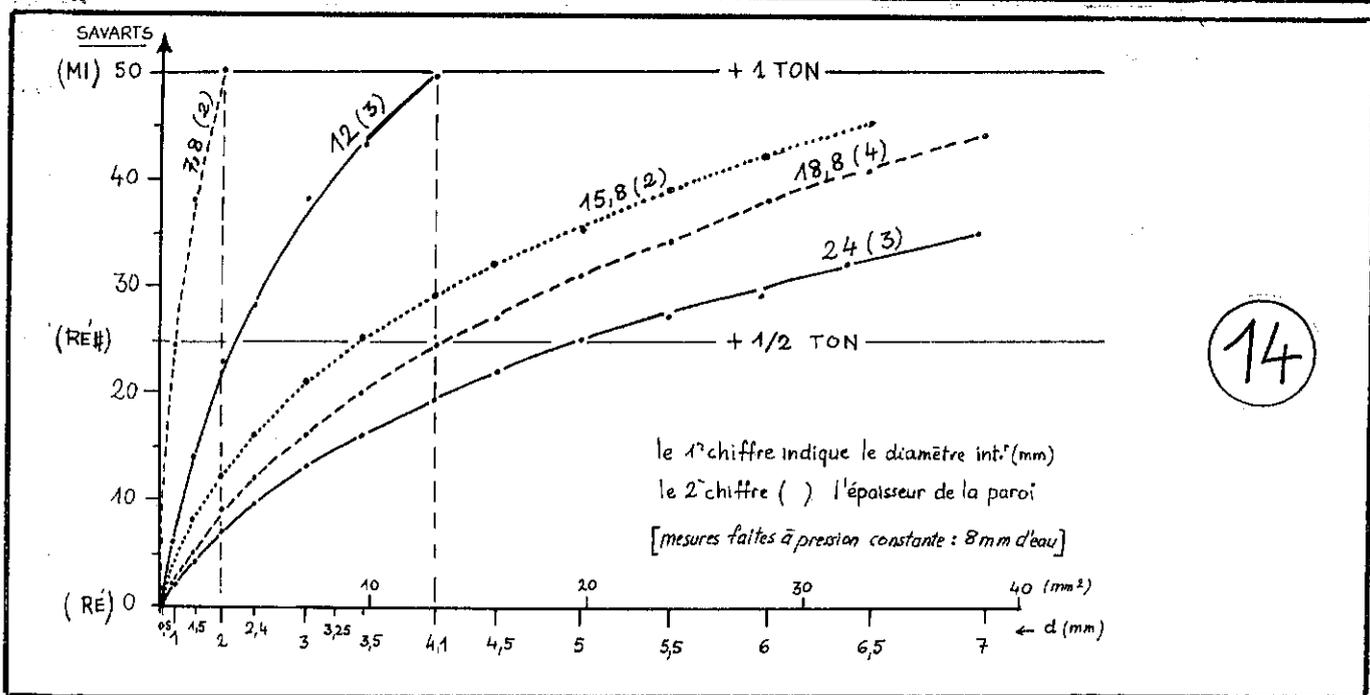
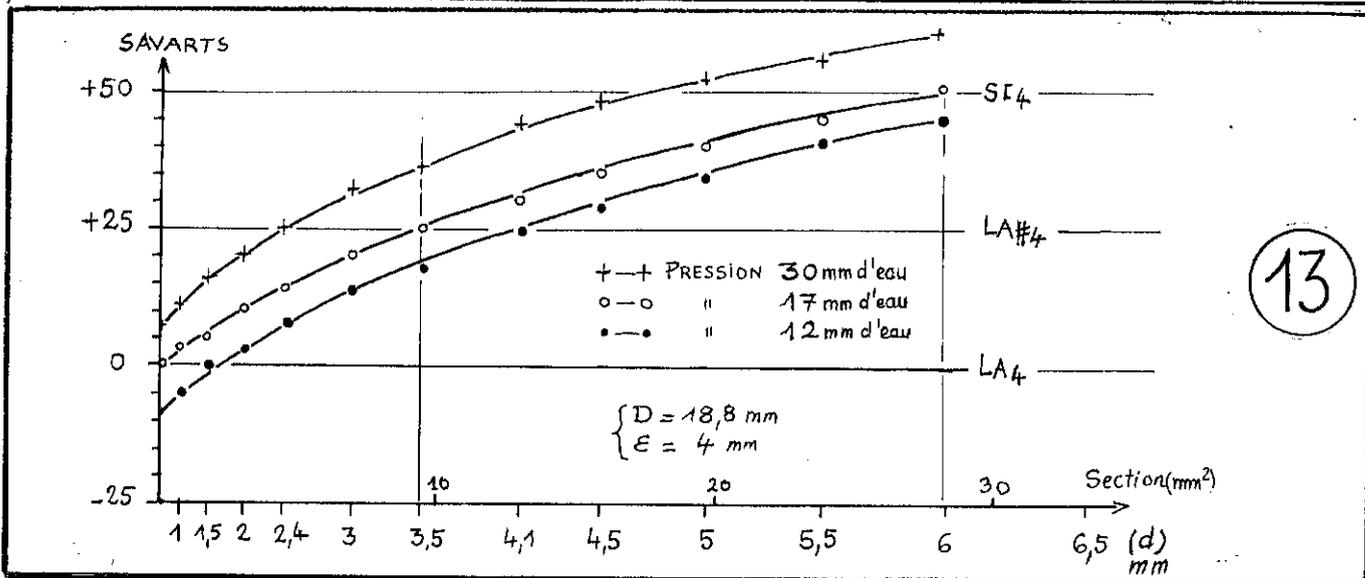
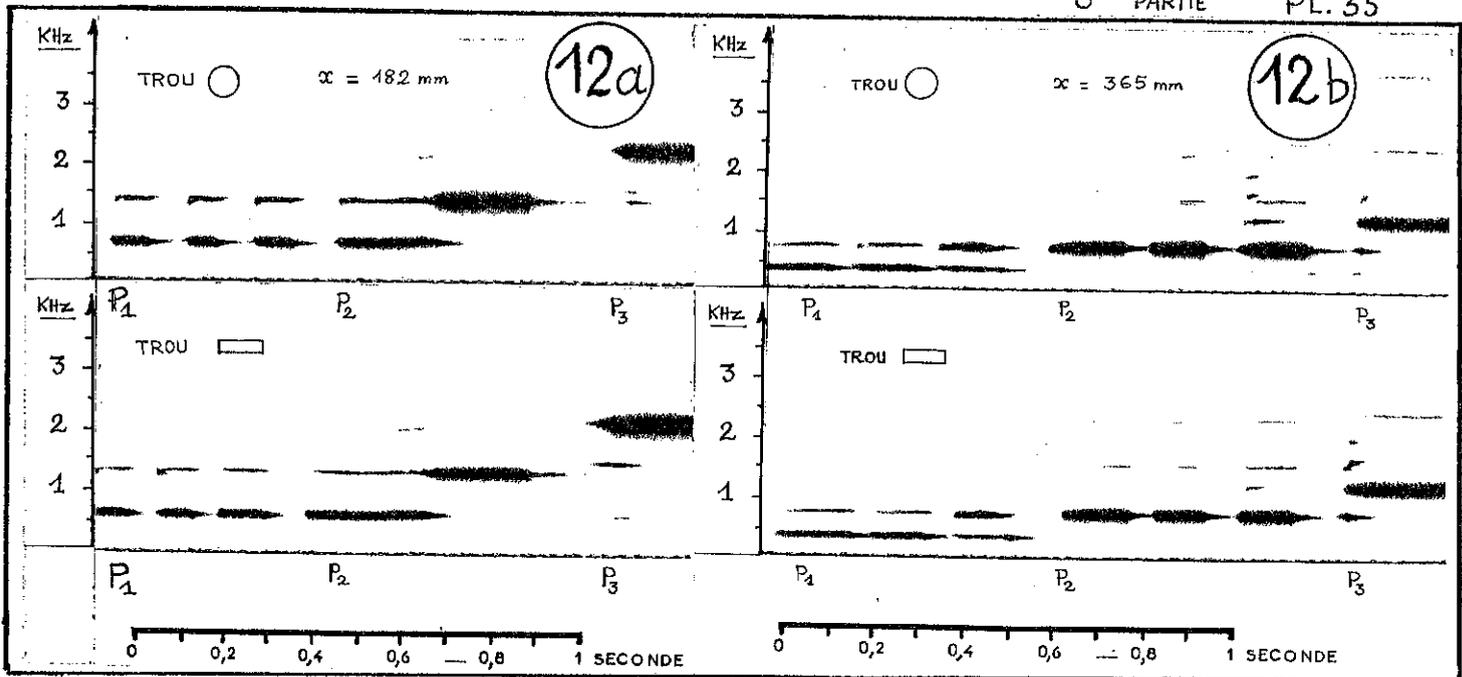
2) DIMENSION DES TROUS

§ 3.12 - Evolution de la fréquence en fonction du diamètre du trou

fig.13

L'expérience courante apprend que plus on agrandit la surface d'un trou, plus la fréquence fondamentale croît. La figure 13 permet de préciser l'allure des phénomènes.

Pour les petites valeurs de la surface du trou, la fréquence croît très vite avec l'agrandissement, puis tend vers une asymptote dont la valeur est théoriquement la fréquence que l'on obtiendrait en coupant le tuyau au niveau du trou.



Du point de vue expérimental, il est intéressant de voir que les courbes sont similaires pour des pressions différentes.

§ 3.13 - Rôle du rapport du diamètre du trou au diamètre du tuyau

Prenons des tuyaux de divers diamètres dans lesquels on perce un trou latéral dans le 1/4 inférieur, et relevons l'évolution de la fréquence du partiel 1 en fonction du diamètre du trou.

Pour faire cette expérience nous avons utilisé l'excitation normale d'un tuyau à bouche, ce qui nous a conduit à raccorder une bouche de pipeau standard à des tuyaux de différents diamètres. Ceci entraîne évidemment une discontinuité de section au niveau du raccordement, donc une complication des phénomènes. De plus, les tuyaux, de provenance différente, n'avaient pas tous la même épaisseur.

fig.14 Néanmoins nous avons pensé intéressant tout de même de faire cette expérience, qui met bien en évidence l'allure des phénomènes. Ainsi on voit sur la figure 14, qu'un trou de 2 mm de diamètre provoque respectivement une montée de la fréquence fondamentale de 7 savarts sur le tuyau $D = 24$ mm et de 50 savarts (un ton!) sur le tuyau de diamètre $D = 7,8$ mm.

3) UN TROU : ROLES DE LA PLACE ET DU DIAMETRE

§ 3.14 - Place des trous et justesse des partiels; expérience préliminaire

Soit un tuyau de longueur L . Pour obtenir un intervalle donné, par exemple un ton avec le fondamental du tuyau sans trou, on peut percer un trou latéral à un endroit quelconque sur la deuxième moitié du tuyau, opposée à l'embouchure, à condition de lui donner les dimensions appropriées. Quelles sont les raisons qui vont nous amener à choisir tel endroit plutôt que tel autre ? Pour y répondre faisons l'expérience suivante.

Sur une flûte à bec, $L = 650$ mm, $D = 20$ mm, perçons un trou aux 9/8 de la longueur totale, près de l'extrémité opposée à l'embouchure. Agrandissons ce trou jusqu'à ce que la fréquence fondamentale du tuyau monte d'un ton tempéré (50 savarts). On relève alors les champs de liberté en fréquence des partiels.

On rebouche ensuite ce trou et on en perce un autre plus rapproché de la bouche, puis on procède aux mêmes relevés. Enfin on recommence les opérations pour un 3ème trou plus proche encore de la bouche. On constate les faits suivants :

- la surface du trou dont le centre est placé aux 8/9 de la longueur totale doit être bien supérieure à celle de la section du tuyau.

Surface du tuyau : 314 mm^2 ; surface du trou : 615 mm^2 .

- plus le trou se rapproche de l'embouchure, plus il doit être petit :

trou T1	$\times 1 = 58,5$ mm	$S1 = 615 \text{ mm}^2$	$d1 = 20$ mm
trou T2	$\times 2 = 56,5$ mm	$S2 = 78,5 \text{ mm}^2$	$d2 = 10$ mm
trou T3	$\times 3 = 52,6$ mm	$S3 = 15,9 \text{ mm}^2$	$d3 = 4,5$ mm

Si on se propose de boucher les trous avec les doigts, il faudra donc mettre les trous plus haut que leur position théorique.

.... /

fig.15 En prenant schématiquement la limite supérieure du champ de liberté en fréquence, on compare la justesse relative des partiels dans chacun des cas (cf. fig.15)

Tous les trous bouchés, les partiels sont plus rigus que les harmoniques correspondants du fondamental, et ceci d'autant plus qu'ils sont de rang élevé, comme nous l'avons vu précédemment (§ 3.02). Ouvrons un à un les trous 1, 2 et 3

- trou 1 : le partiel 2 est légèrement trop haut, comme d'ailleurs les partiels suivants.
- trou 2 : les partiels 2 et 3 sont justes; le partiel 4 est nettement trop bas.
- trou 3 : dès le partiel 2 la fausseté est importante et croît très vite avec le numéro du partiel; elle atteint 3/4 de ton pour les partiels 4 et 5.

En pratique nous sommes donc placés devant un problème dont la solution ne peut être qu'un compromis : le trou doit être suffisamment grand pour que les partiels ne s'écartent pas trop de la série harmonique, mais pas trop grand pour ne pas poser de problèmes de bouchages par les doigts.

Pour mieux étudier l'évolution de la fréquence des partiels en fonction de la place du trou latéral nous avons fait quelques expériences systématiques.

§ 3.15 - Déplacement continu d'un trou latéral rectangulaire (5 x 5). Conséquences sur les fréquences de partiels du tuyau.

- Matériel expérimental :

Pour cette étude nous avons mis au point un dispositif expérimental permettant de déplacer quasi continûment un trou latéral, en restant dans les conditions normales d'excitation par un jet.

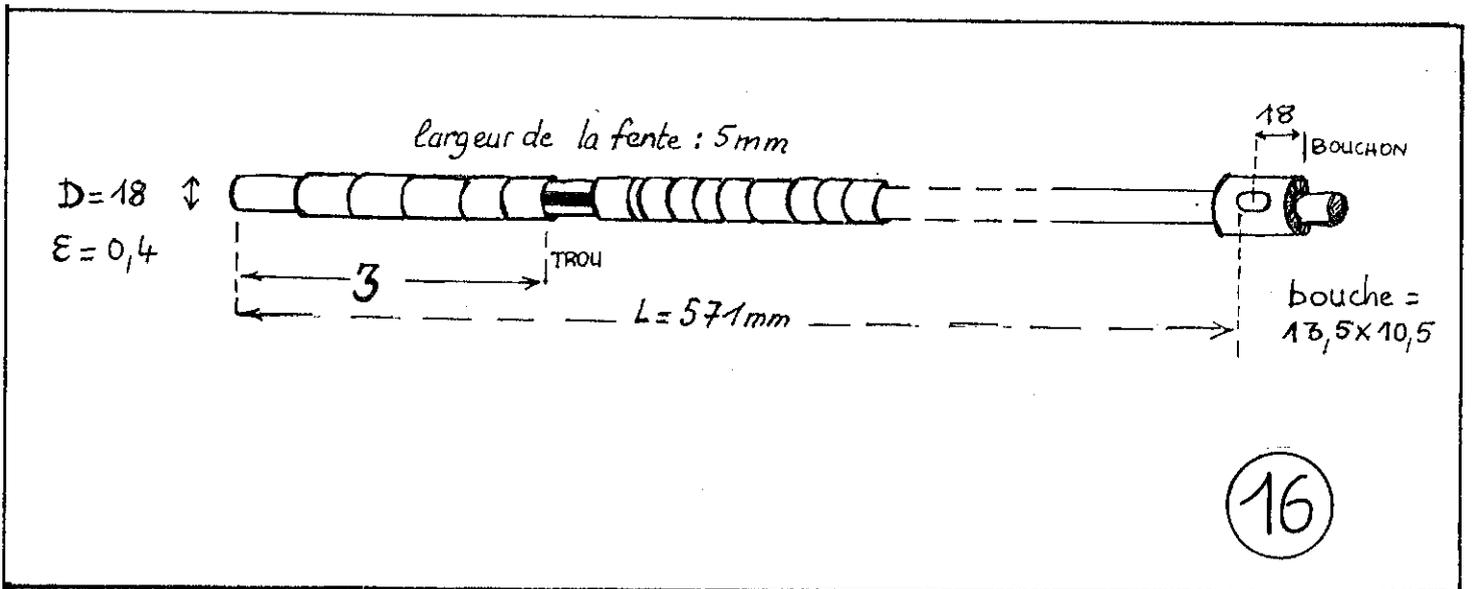
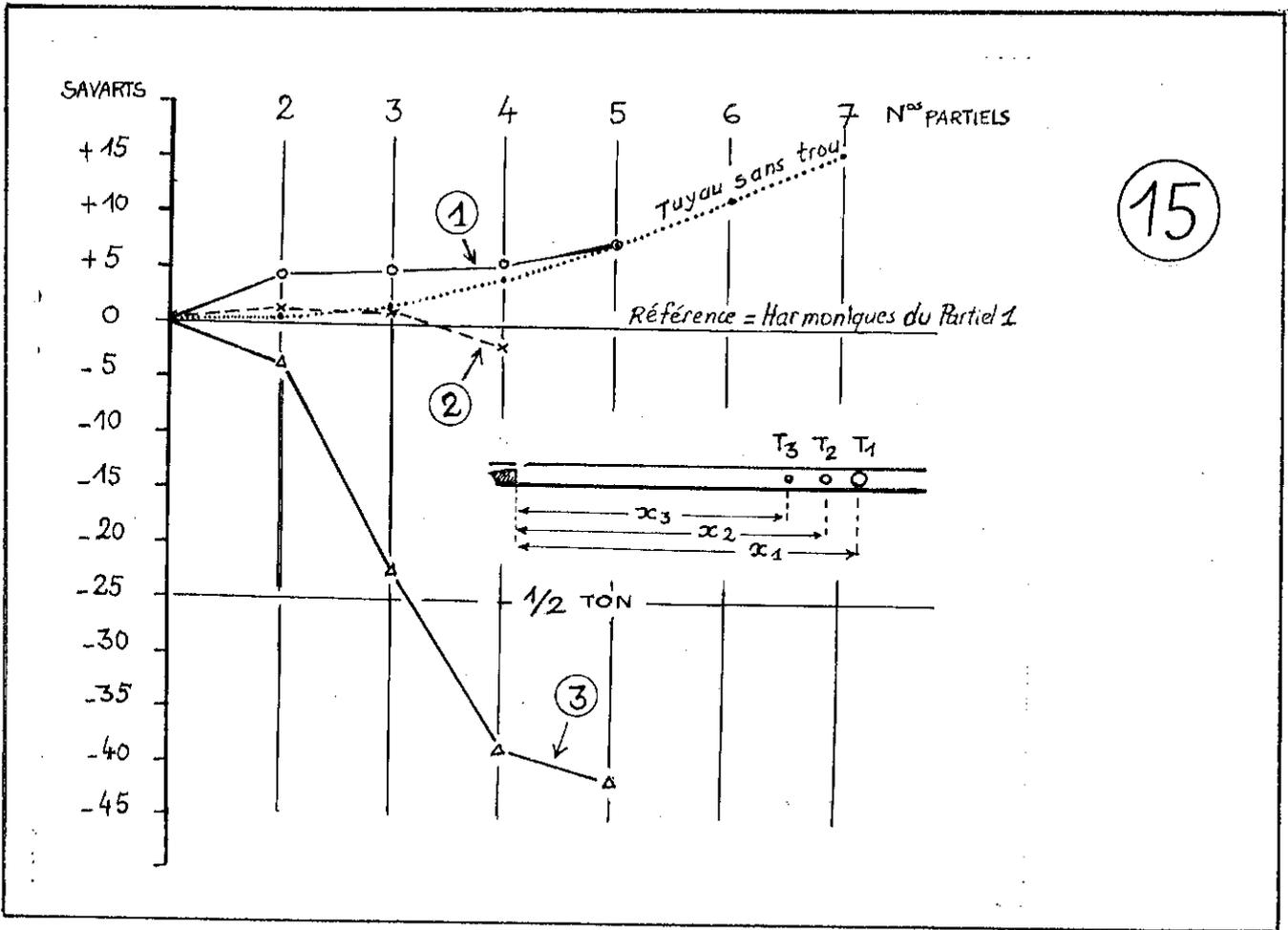
fig.16 Nous avons utilisé 2 tubes d'acier de faible épaisseur (0,4 mm) coulissant parfaitement l'un dans l'autre. Sur le tube intérieur on pratique une fente longitudinale de 5 mm de largeur. Le tube extérieur est découpé en rondelles de 1 à 10 mm de largeur. En enfilant ces rondelles sur le premier tube on peut donc ménager des trous rectangulaires de surface variable (une des dimensions est toujours 5 mm), aux endroits choisis du tuyau (cf. fig.16).

A une extrémité du tuyau on adapte une embouchure de flûte traversière, qu'un dispositif mécanique, conçu et réalisé au laboratoire de St-Cyr-l'École permet d'exciter de façon optimale. On recherche, par tâtonnements la position pour laquelle on obtient les 5 premiers partiels avec suffisamment d'intensité; on bloque ensuite les réglages pour la durée de l'expérience.

- Trous de 5 x 5 mm

Au départ le bord inférieur du trou est à 50 mm de l'extrémité ouverte. Puis on le déplace de cm en cm. Pour chaque position du trou on relève le champ de liberté en fréquence des sons successifs produits par le tuyau lorsqu'on augmente la pression d'alimentation. On porte sur la figure la fréquence (échelle logarithmique) en fonction de la distance du trou à l'extrémité ouverte.

Le problème des corrections de longueur étant compliqué par le fait que nous utilisons des trous rectangulaires, il nous a semblé préférable, pour toute cette



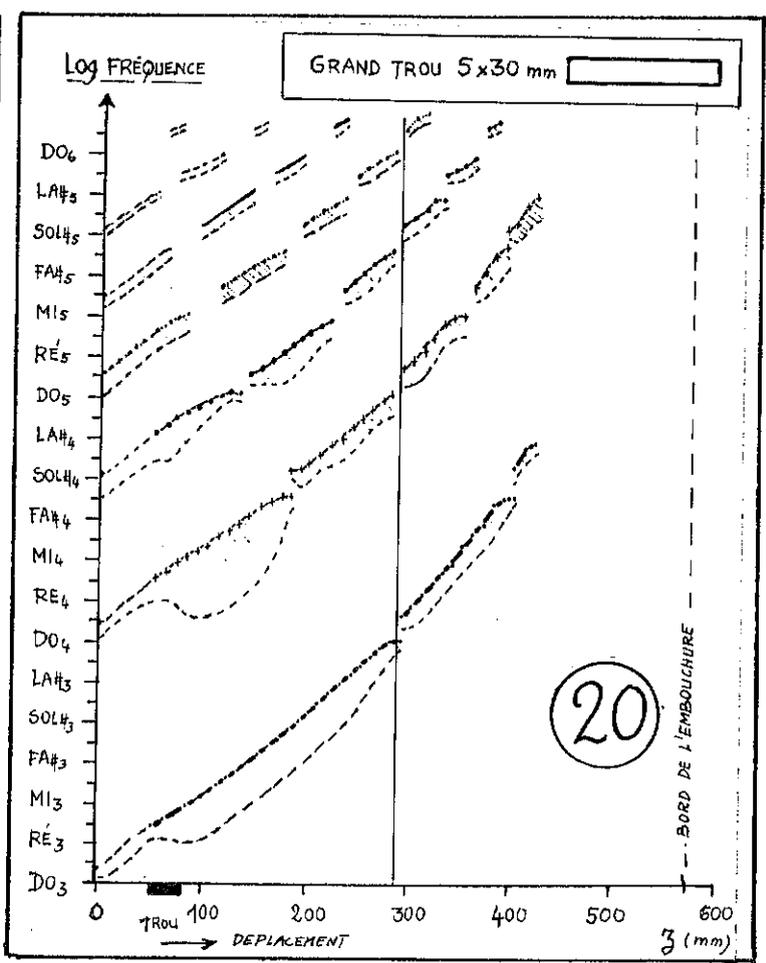
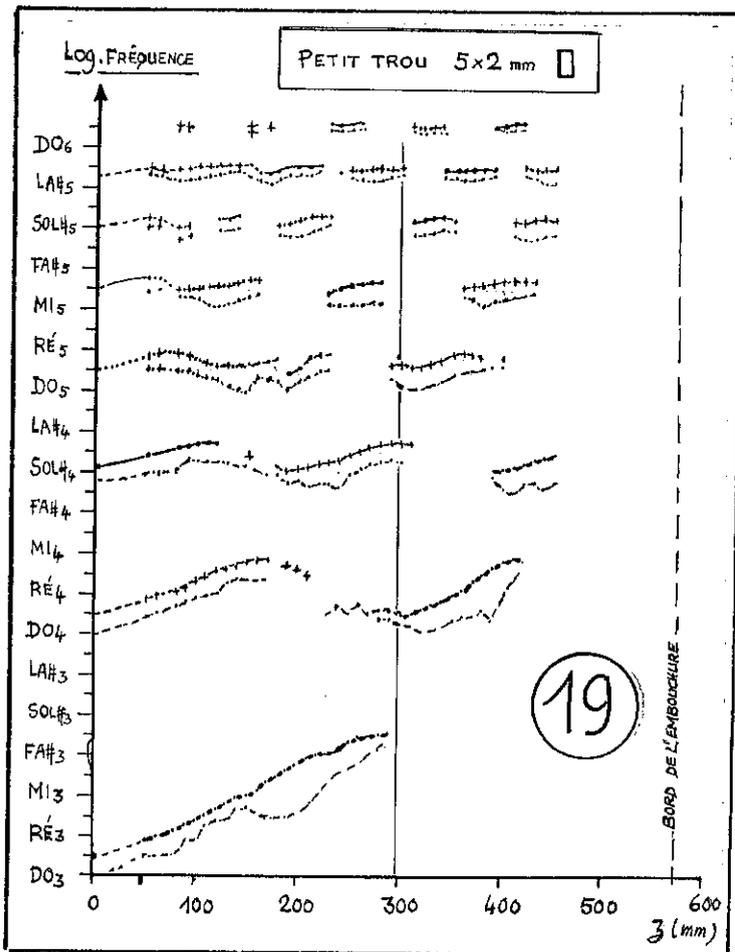
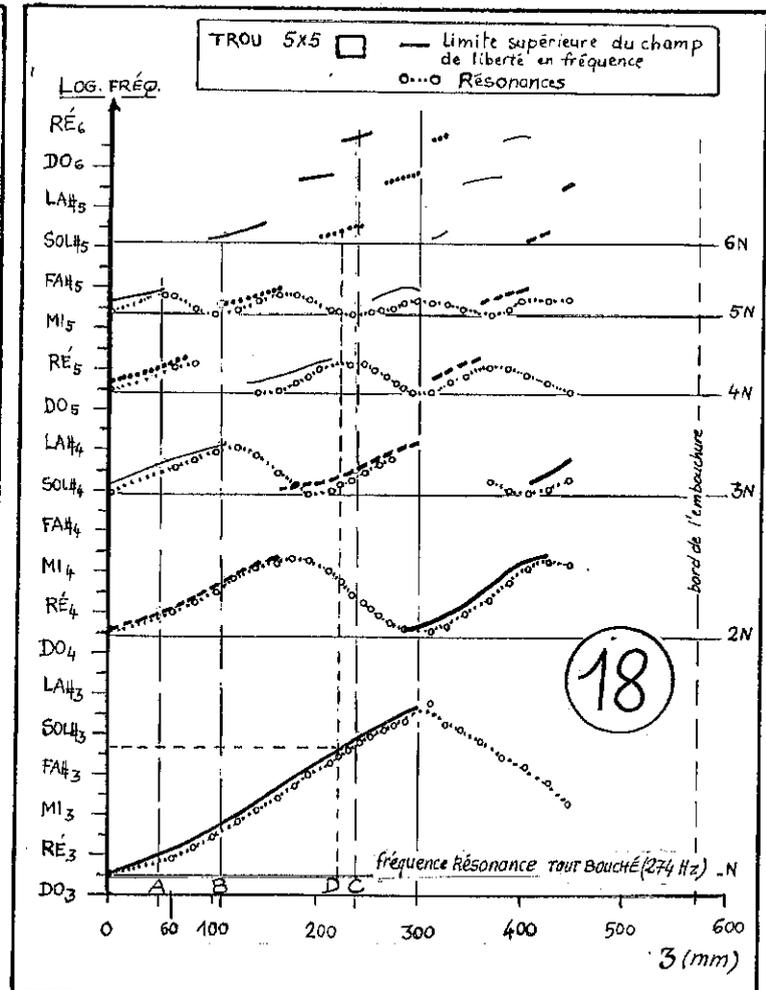
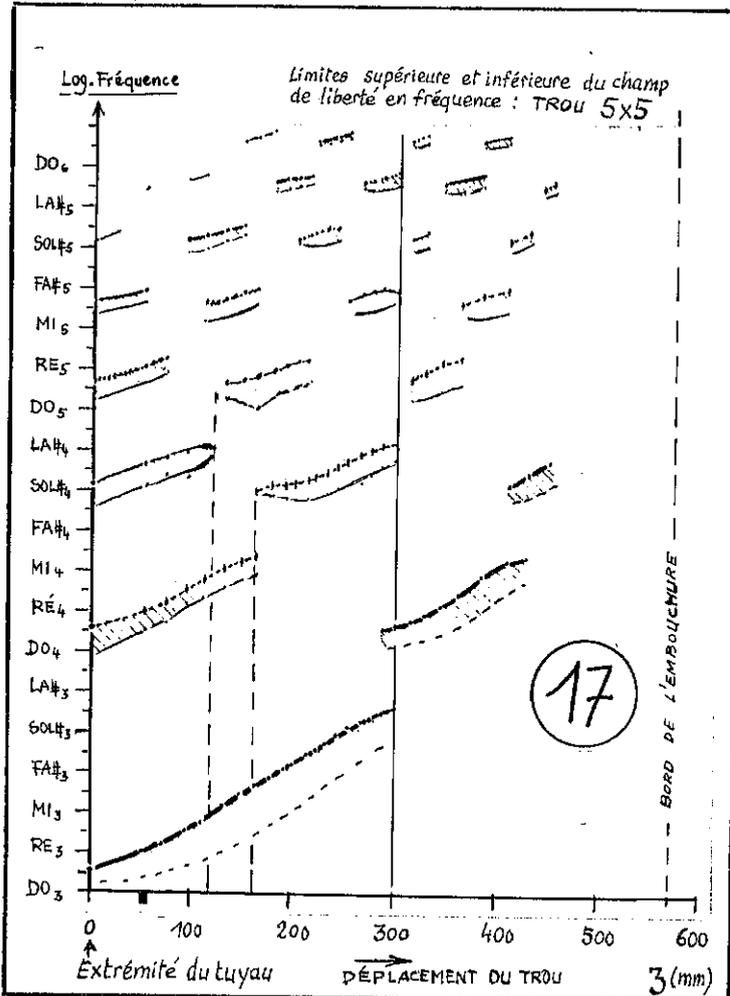


fig.17. série d'expériences, de repérer le trou par la distance entre l'extrémité ouverte du tuyau et le bord du trou proche de celle-ci (z), fig.16.

Suivons par exemple les 3 premiers " partiels ". Lorsque le trou se rapproche de l'embouchure (z croît), leurs fréquences respectives, proches de celles des harmoniques 1, 2 et 3, montent parallèlement. Puis, à un moment donné, le partiel 3 baisse sensiblement, devient faible, instable (le champ de liberté en fréquence se rétrécit) et disparaît,

Continuons à faire croître z ; le partiel 3 réapparaît, plus aigu que l'harmonique correspondant, et amorce une montée. Puis, quand on arrive vers le $1/4$ du tuyau, ($z \approx L/4$) c'est le partiel 2, trop bas, qui saute brusquement vers le haut, de 150 savarts. On peut même, en choisissant convenablement la pression, produire simultanément 2 sons instables. Mi3 + 12 savarts et Sol# 3. Si on continue à rapprocher le trou de l'embouchure, on voit de nouveau le partiel 3 disparaître, puis c'est le tour du partiel 1.

En examinant la figure on note effectivement une série de courbes ascendantes apparemment discontinues et sans rapport les unes avec les autres, mais on vérifie qu'elles apparaissent et disparaissent à des points définis : la $1/2$, le $1/3$, le $1/4$ de la longueur totale; selon le partiel considéré.

Pour étudier le phénomène et ses relations avec les résonances du tuyau, nous avons alors procédé à l'excitation du tuyau par haut-parleur, en déplaçant le trou de la même manière que précédemment.

fig.18 Portons sur une même figure la limite supérieure du champ de liberté relevé précédemment et les courbes de résonance. On voit immédiatement que les courbes obtenues en excitant le tuyau par un jet ne sont pratiquement que la partie ascendante des courbes de résonance. (fig.18)

§ 3.16 - Même expérience avec un petit trou (5 x 2) et un grand trou (5 x 30).

fig.19 Les résultats expérimentaux obtenus en excitant le tuyau par un jet sont portés fig. 19 et 20. Lorsque le trou est très petits, les sauts sont nets et importants.
fig.20 Au contraire, avec un très grand trou, les courbes se raccordent quasi-continûment.

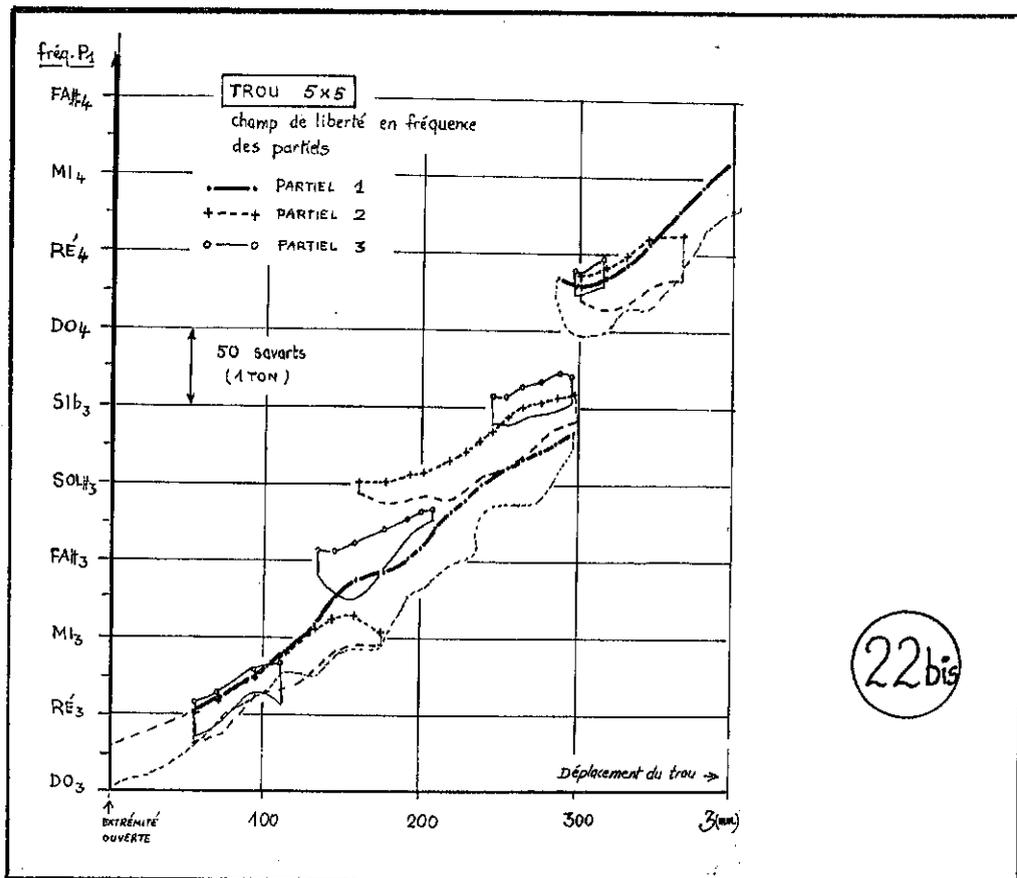
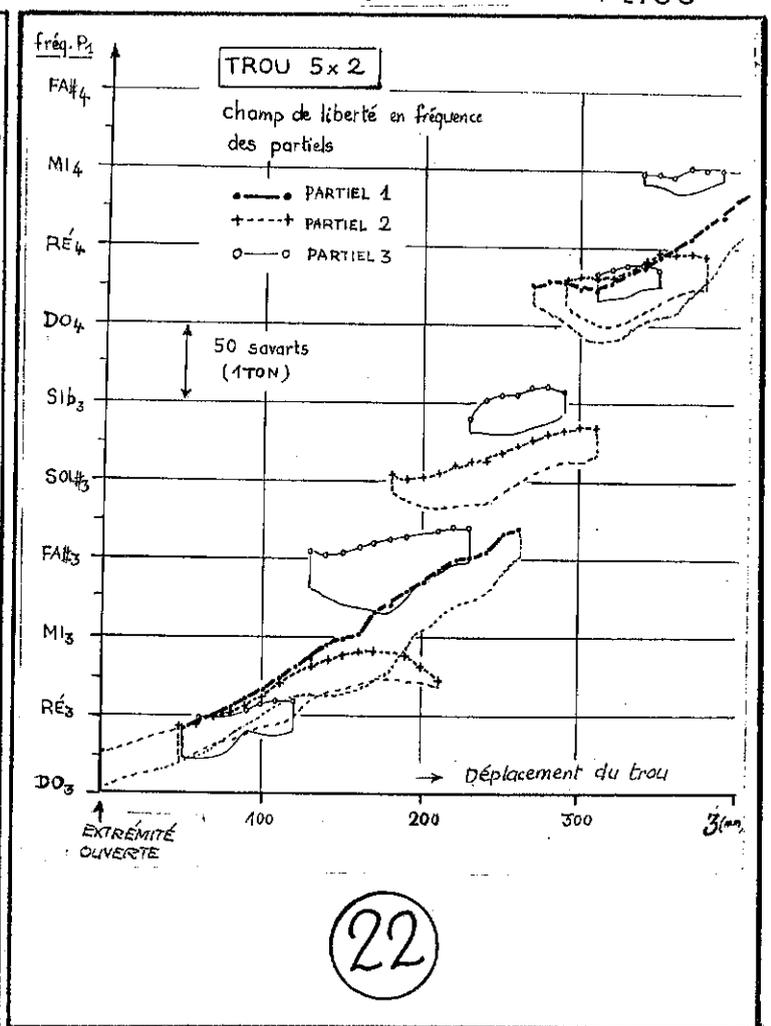
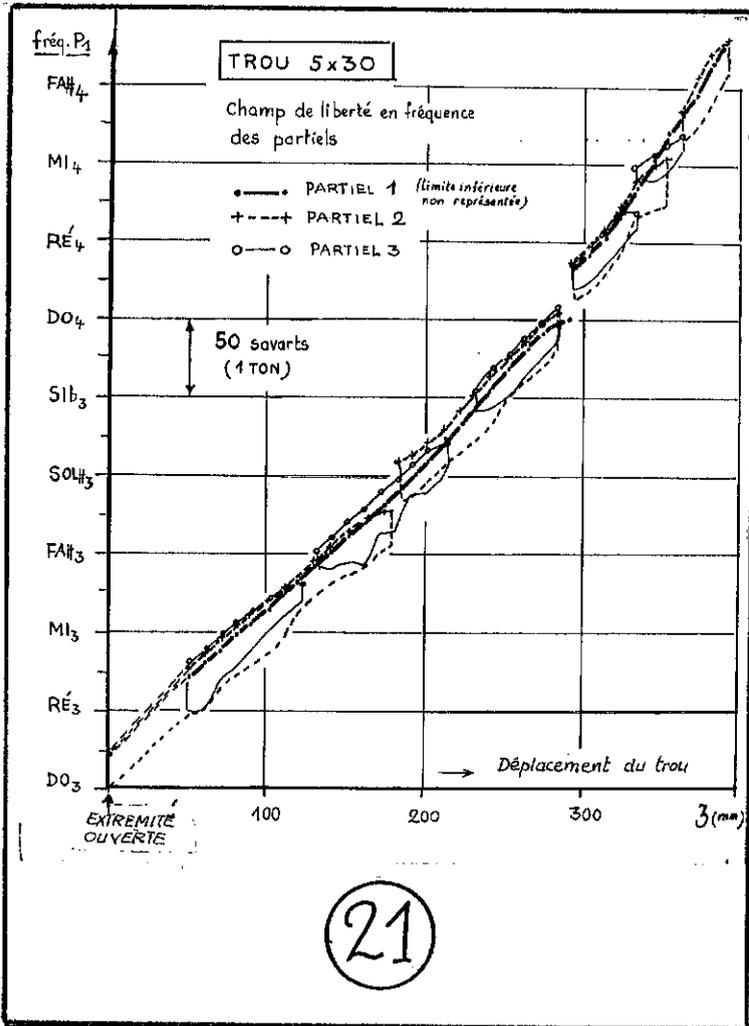
fig.21 Corrélativement, la fausseté des partiels est d'autant plus grande que le trou est plus petit, comme on peut l'observer sur les figures 21 et 22.
fig.22

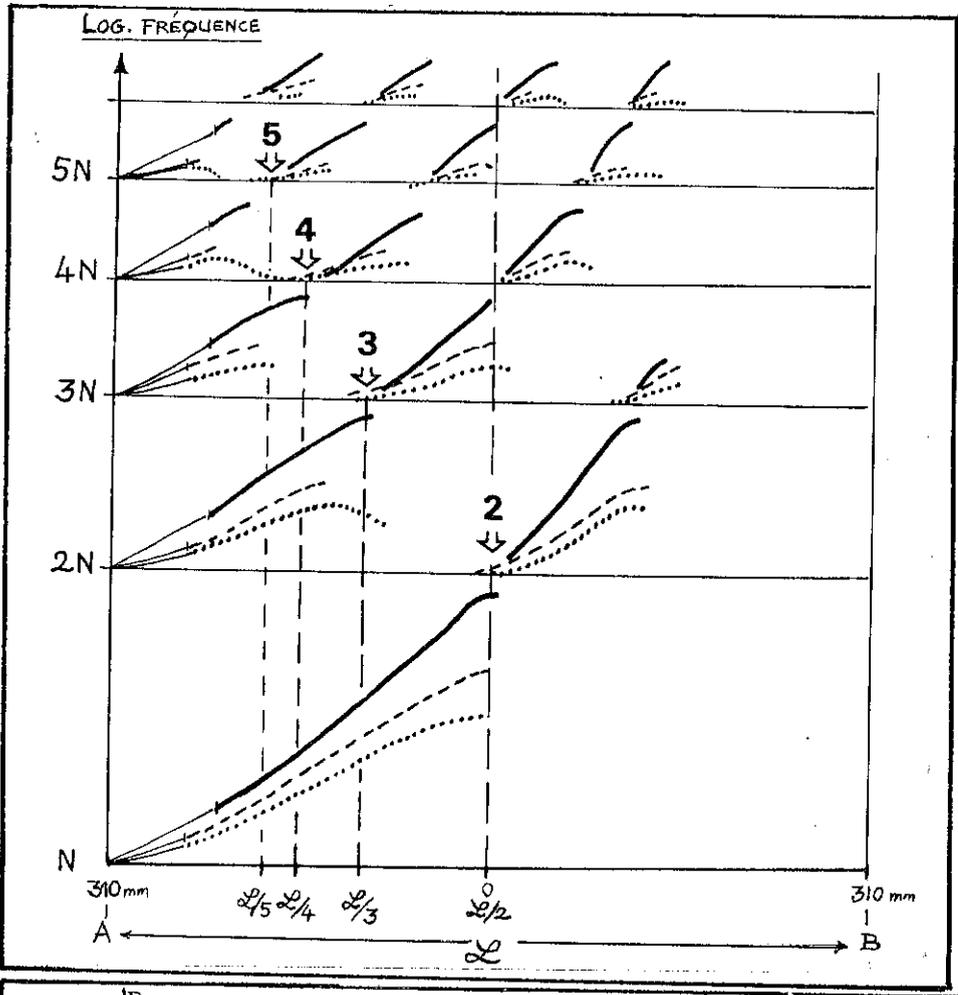
Il convient de faire ici quelques observations relativement à l'emploi du mot " partiel ". Lorsqu'on excite le tuyau avec un haut-parleur, les phénomènes sont clairs. A chaque partiel correspond une courbe continue, alternativement croissante, puis décroissante en fréquence, au fur et à mesure que le trou progresse vers l'embouchure. Lorsqu'on excite le tuyau normalement, avec un jet, la suite des sons possibles ne correspond pas toujours aux partiels réels du tuyau.

fig.18 Prenons un exemple : Points A, B, C, fig.18

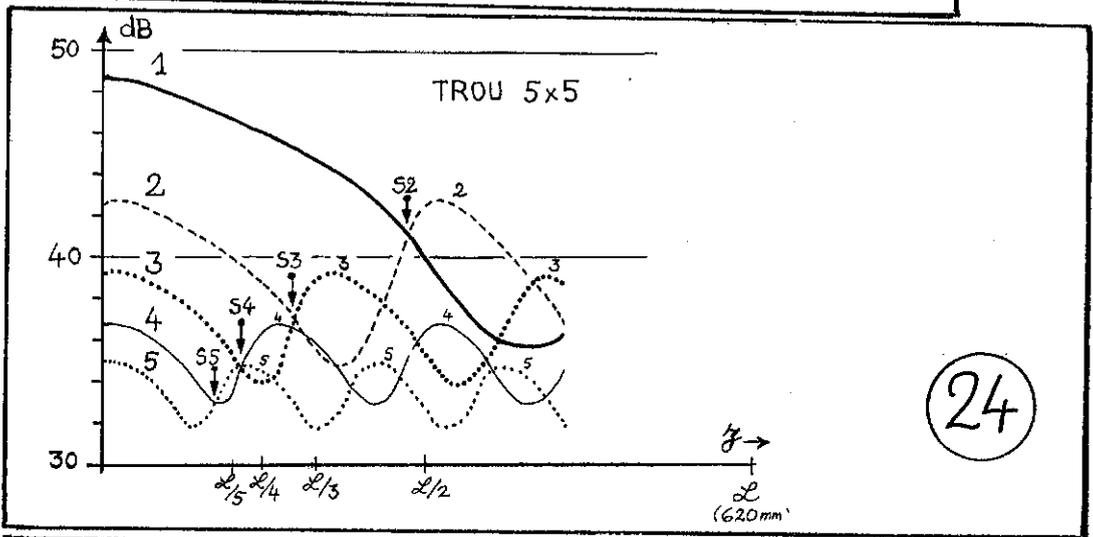
- A - Le trou (5 x 5) est à 50 mm de l'extrémité ouverte. Les cinq premiers partiels que le tuyau émet correspondent aux 5 premières résonances.
- B - Le trou est à 110 mm de l'extrémité ouverte. Les 5 premiers sons du tuyau correspondent aux résonances 1, 2, 3, 5 et 6.
- C - Le trou est à 240 mm. Les 5 premiers sons correspondent aux résonances 1, 3, 5, 6, 8.



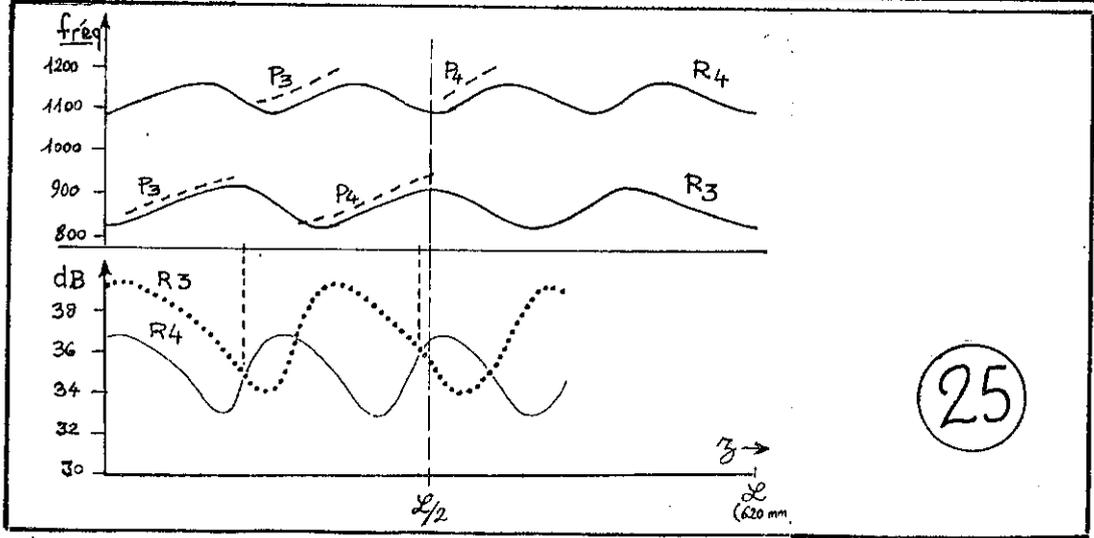




23



24



25

Du point de vue musical, (celui qui nous intéresse plus particulièrement), nous sommes portés à nommer - partiel 3 - le 3ème son que produit effectivement le tuyau, et à apprécier sa justesse par rapport à l'harmonique 3 du fondamental (ou partiel 1).

§ 3.17 - Interprétation des résultats; sauts en fréquence des partiels

- Emplacement des sauts.

fig.23

Sur la figure 23 on a superposé les courbes de fréquence pour trois surfaces différentes du trou : les sauts se produisent, à peu de choses près, aux mêmes endroits. Il est intéressant d'exprimer l'abscisse de ces points particuliers en rapport avec la longueur totale d'un tuyau sans embouchure ayant la même fréquence fondamentale. Pour les déterminer graphiquement, nous partons du " milieu acoustique " du tuyau, correspondant à l'abscisse du saut du partiel 1. Prenant 274 Hz (Do # 3 - 5 savarts) comme fréquence fondamentale, on obtient la longueur théorique ($L = 620$ mm), du tuyau sans trou. On reporte alors 310 mm de part et d'autre du milieu O, ce qui donne une nouvelle origine A, tenant compte de la " correction " au bout ouvert (environ 10 mm).

Les points $L/5$, $L/4$ et $L/3$ sont en bonne concordance avec les emplacements des sauts des partiels 4, 3 et 2.

- Amplitude des résonances.

fig.24

A partir de la théorie des analogies électriques Y. NAGAI a calculé les amplitudes relatives des résonances en fonction de la position du trou. Elles sont représentées sur la figure 24.

Considérons par exemple les courbes 4 et 5. Quand $z = 0$ (pas de trou) l'amplitude des résonances décroît régulièrement avec leur rang, et, en particulier, intensité de R4 > intensité de R5.

Eloignons le trou de l'extrémité, l'amplitude décroît pour l'ensemble des résonances. Puis, à un moment donné, la 5ème résonance redevient plus intense alors que la 4ème continue à décroître, et il se produit un croisement des courbes (points S5). De la même façon on note le point S4 au croisement des courbes 4 et 3 et ainsi de suite pour S3 et S2.

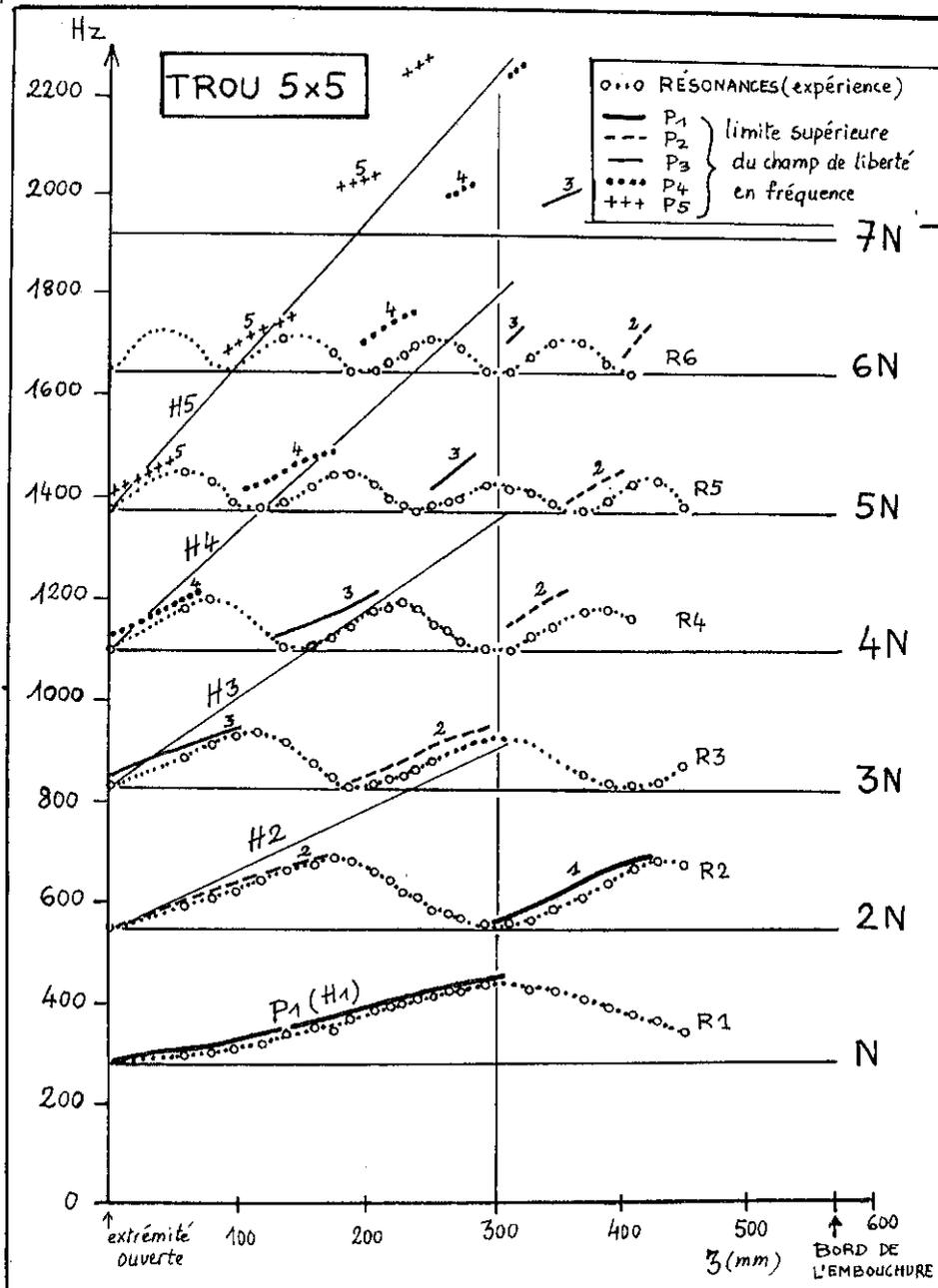
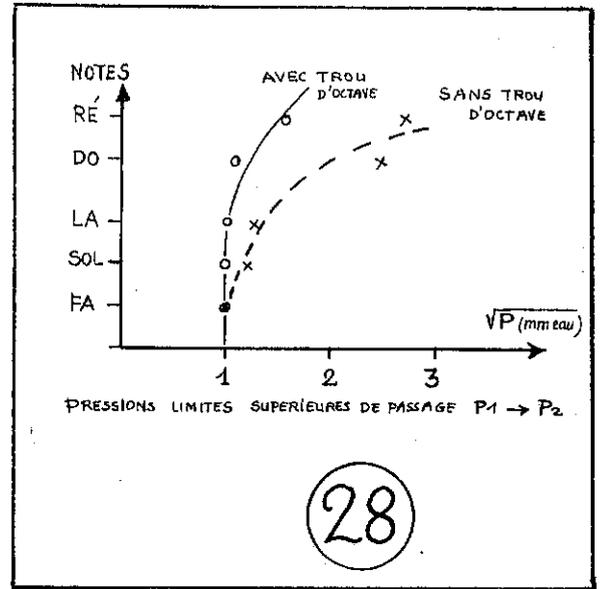
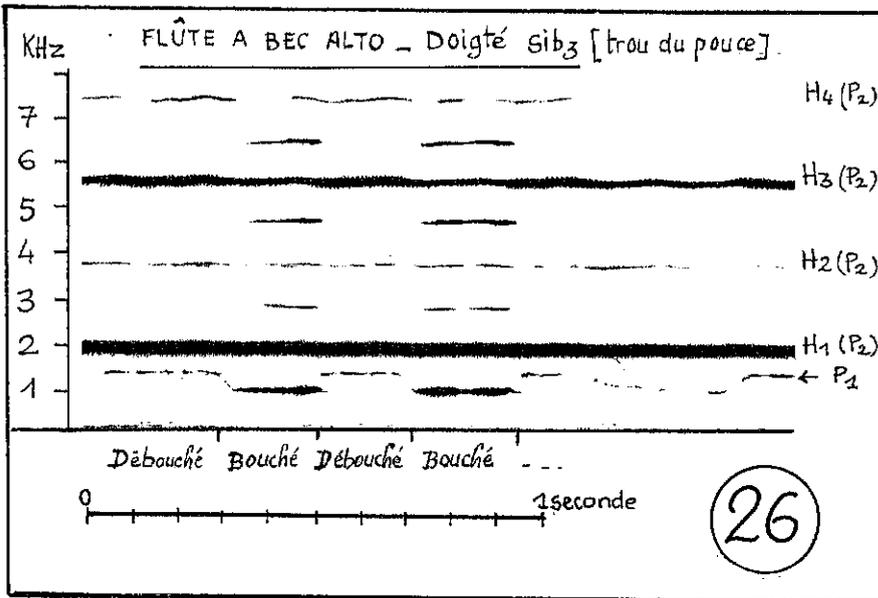
Si nous comparons l'abscisse des points S avec les emplacements des sauts on note, à un décalage près de 15 mm, une correspondance intéressante.

fig.25

Portons en regard, sur une même figure, d'une part les fréquences des résonances 3 et 4 calculées, la limite supérieure du champ de liberté en fréquence des partiels voisins de ces résonances, et d'autre part les courbes d'amplitude de ces mêmes résonances (fig.25).

On voit que les portions de la courbe de résonance N° 3, effectivement produites par le jet correspondent aux parties décroissantes de la courbe d'amplitude, tant que la résonance de rang suivant reste inférieure en intensité. Au moment du croisement des courbes, on note le saut du partiel 3, de la 3ème courbe de résonance à la 4ème.

Pour une valeur supérieure de z (environ 300 mm) on observe un deuxième croisement des courbes d'amplitude. Celui-ci correspond cette fois au saut du partiel 2.



Il nous faut maintenant examiner pourquoi certains sons, correspondant à des courbes de résonance ne sont pas produits par le jet.

§ 3.18 - Comparaison entre les fréquences de résonance et les partiels émis par le tuyau à bouche

L'écoute attentive nous apprend que lorsqu'on joue un partiel quelconque d'un tuyau, on entend simultanément le fondamental " chuchoté " (c'est-à-dire de faible intensité).

fig.26

On vérifie le phénomène au sonographe (cf. fig.26).

En fait, plusieurs ondes stationnaires coexistent et l'intensité d'un partiel donné sera d'autant plus grande que sa fréquence sera plus proche de l'un des harmoniques du partiel 1.

Prenons un exemple en nous reportant à la figure 18 point D. Le trou de 5 x 5 mm est à 220 mm de l'extrémité ouverte. Le partiel 1 (Sol3 + 8 savarts) est voisin de 400 Hz.

On aura donc la série harmonique suivante :

N°s Harm.	H1	H2	H3	H4	H5
Fréquence	400 Hz	800 Hz	1200 Hz	1600 Hz	2000 Hz
Notes mus.	Sol3+8	Sol4+8	Ré5+8	Sol5+8	Si5+8

Les résonances relevées expérimentalement au même point sont :

N°s Rés.	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Fréquences	400 Hz	640 Hz	840 Hz	1180 Hz	1380 Hz	1739 Hz
Notes mus.	Sol3+8 P1	Ré4+12	Sol4+5 P2	Ré5+2 P3	Fa5-5	Sol5+20 P4

Les quatre premiers partiels effectivement excités par le jet correspondent donc aux résonances 1, 3, 4 et 6 dont les fréquences s'approchent au mieux de la série harmonique du fondamental (partiel 1).

Dans certains cas, deux résonances peuvent être également voisines d'un harmonique (par excès ou par défaut); on constate alors une instabilité du partiel correspondant qui, saute erratiquement de l'une à l'autre fréquence.

Il peut arriver aussi que les deux résonances coexistent de façon stable : on a alors des sons doubles, accompagnés de sons de combinaison (différentiels et additionnels) cf. § 2.28.

Portons de nouveau la variation en fréquence des partiels et des résonances en fonction de la place du trou, mais cette fois avec une échelle de fréquence linéaire (fig.27).

fig.27



Les droites obliques en trait plein sont les harmoniques du partiel 1. Enfin, traçons les horizontales de fréquence $N, 2N, 3N \dots$, N étant la fréquence du fondamental du tuyau sans trou (274 Hz). On voit nettement que seules les portions ascendantes des courbes de résonance s'approchant au mieux des harmoniques du partiel 1, sont produites lors de l'excitation avec un jet.

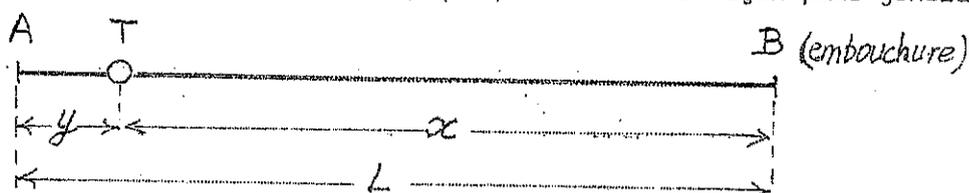
On peut également apprécier la justesse des partiels :

Ex : le partiel 3 est d'abord plus aigu que l'harmonique 3. Puis, comme la pente de sa courbe est plus faible que celle de l'harmonique 3 il se rapproche de celui-ci, l'atteint, puis devient plus grave que cet harmonique. La fausseté (par défaut) s'accroît jusqu'au moment où quittant la 3ème résonance il saute à la 4ème et redevient plus aigu que l'harmonique 3.

Il est clair que les partiels ne sont à peu près justes que lorsque le trou est situé très près de l'extrémité inférieure du tuyau. Mais en pratique, grâce au champ de liberté en fréquence, on peut largement ajuster les partiels.

§ 3.19 - Zones d'existence en fréquence des partiels

Nous pouvons essayer de résumer ce qui précède d'une façon plus générale



Dans un tuyau sans trou, les partiels 2,3,4,...n correspondent à la subdivision du tuyau en 2,3,4,, n fois $\lambda/2$.

Lorsqu'on perce un trou T, les partiels possibles correspondent à la vibration de $TB = X$, et à sa subdivision en parties égales.

En fait, la vibration du tuyau dans sa longueur totale L ne disparaît pas complètement. On entend toujours le fondamental du tuyau sans trou.

Lorsque le trou s'approche d'une position telle que $L/y = n$, (n est un entier), il se produit le phénomène suivant : la vibration dans L devient momentanément plus intense, et le partiel (n) de L , qui a un ventre de vitesse en T impose sa fréquence au partiel ($n-1$) de X . Celui-ci subit un saut et passe à la résonance d'ordre supérieur.

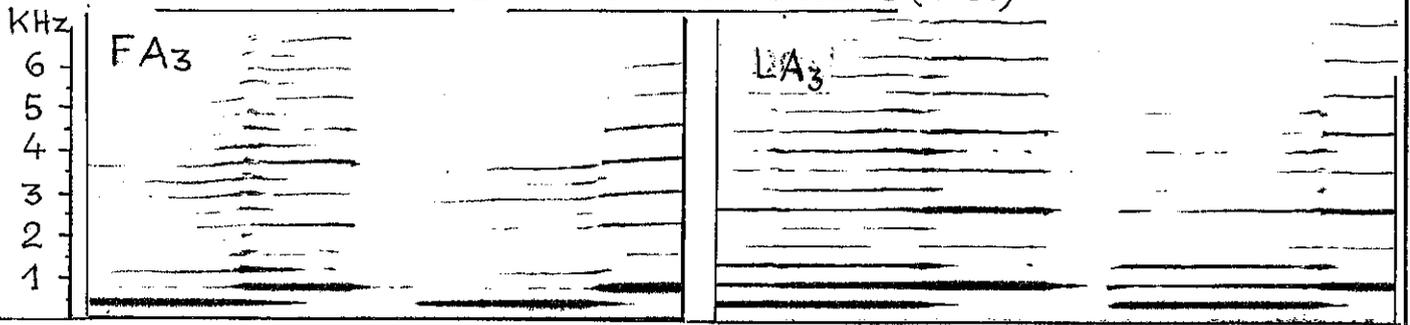
fig.23

La réaction de l'onde existant dans L sur l'onde existant dans X est d'autant plus importante que l'aire du trou est plus petite. Reportons nous à la figure 23 où l'on a superposé les résultats d'expériences faites avec trois trous de dimensions différentes. On voit bien que les fréquences des partiels pour un trou de 5×2 s'écartent très peu des harmoniques du fondamental du tuyau sans trou. Il en résulte des sauts importants pour les partiels. Au contraire, pour un trou très grand (5×30) on peut considérer que l'onde existant dans L est pratiquement éliminée. C'est tout juste si l'on décèle de petites discontinuités dans les fréquences des partiels.

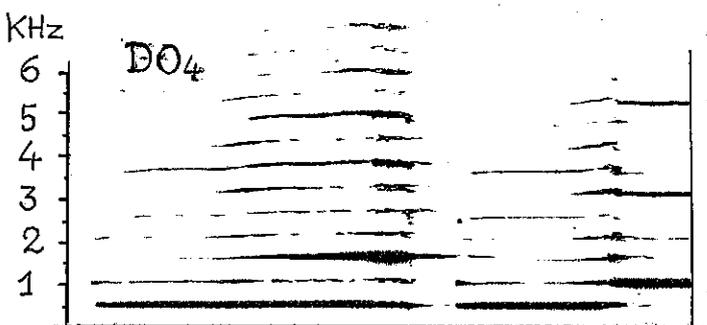
§ 3.20 - Le trou d'octave et le trou du quintoiement

- Définition : Le trou d'octave est un petit trou que l'on débouche pour amorcer plus aisément et avec plus de sûreté le partiel 2, proche de l'octave aiguë du fondamental.

FLÛTE A BEC ALTO - Rôle du trou d'octave (T.O.)

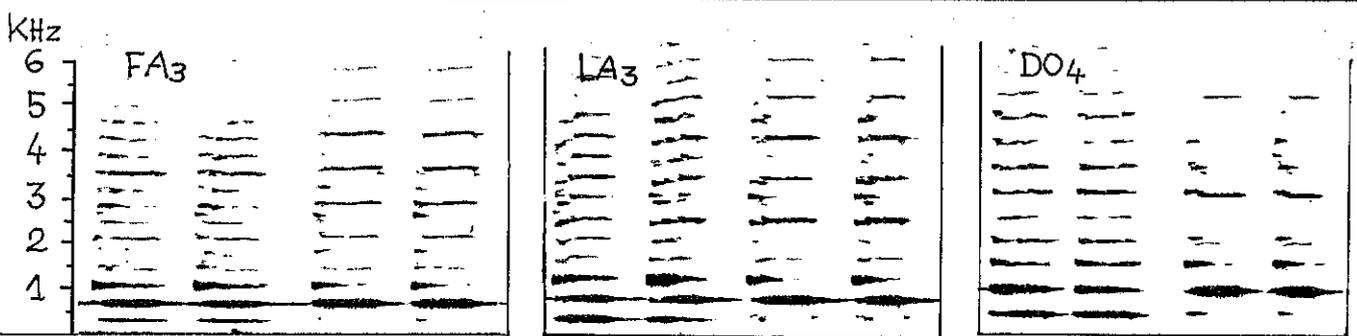
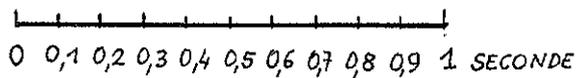


Sans T.O. avec T.O. Sans T.O. avec T.O.
 Passage du partiel 1 au partiel 2 en forçant le souffle : sans, puis avec trou d'octave (T.O.)

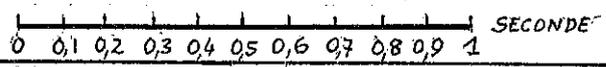


29

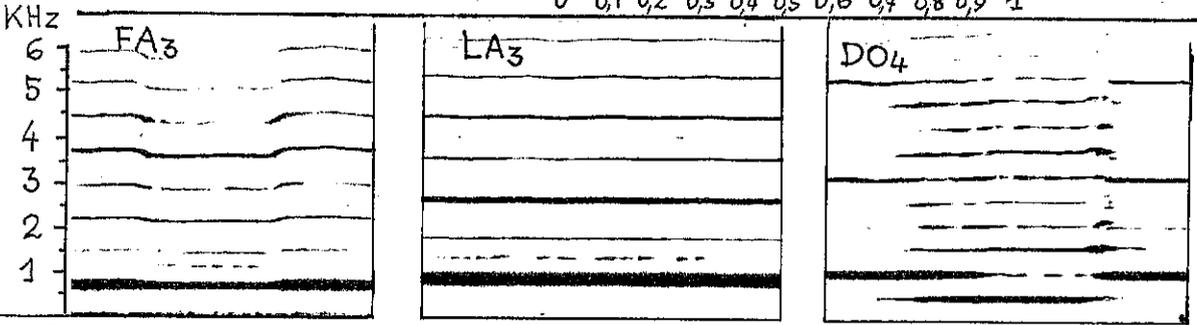
Sans T.O. avec T.O.



Attaques staccato du partiel 2, trou d'octave bouché (2 fois) puis ouvert (2 fois)



30



31

Sur le partiel 2 tenu le trou d'octave est ouvert (O) fermé (F) puis ouvert (O)

De même, le trou de "quintoisement" est destiné à favoriser l'excitation du partiel 3.

Dans la plupart des flûtes à bec, on produit les sons de la 2ème octave avec le même doigté que celui de la 1ère, mais en débouchant partiellement un trou supplémentaire confié le plus souvent au pouce de la main gauche.

- Rôle du trou d'octave : Le but est de gêner la production du partiel 1. Pour cela on place ce trou d'octave au voisinage du noeud de vitesse de ce partiel.
- Place : Le trou d'octave doit donc être placé à la moitié de la longueur vibrante du tuyau pour le fondamental. Dans le cas d'une flûte à plusieurs trous il faudrait donc en théorie, autant de trous d'octaves que de fondamentaux... On imagine les complications de doigtés, de clérierie qui résulteraient de l'application d'un tel principe. En fait, pour gêner la production d'un noeud de vitesse, le petit trou que l'on débouche n'a pas besoin d'être à l'emplacement exact de ce noeud; il est efficace dans une large zone autour de la position théorique. C'est pourquoi, dans la grande majorité des flûtes on n'utilise qu'un trou pour faire octavier tous les fondamentaux de l'instrument.

Toutefois, les effets du trou d'octave unique ne seront pas identiques pour les divers fondamentaux de l'instrument.

§ 3.21 - Effets du trou d'octave. Expérience avec une flûte à bec alto

fig.28
PL.40

Sur la figure 28 on a porté les pressions limites supérieures de passage au partiel 2, avec et sans trou d'octave. On voit bien que lorsqu'on débouche le trou d'octave, on peut obtenir les partiels 2 pour des pressions beaucoup plus faibles. Ce résultat est intéressant pour un instrument comme la flûte à bec dans lequel pression et intensité sont liés. Grâce au trou d'octave on pourra jouer les sons de la deuxième octave assez doucement, donc éviter une trop grande différence d'intensité entre le grave et l'aigu. Lorsque l'instrument est à excitation réglable (flûtes à encoche, oblique, traversière) nous avons vu que le choix d'un partiel s'obtenait principalement en ajustant la longueur du jet. Le trou d'octave n'est pas nécessaire.

Nous avons enregistré, puis analysé au sonographe les expériences suivantes pour trois fondamentaux différents : FA3, LA3 et DO4.

fig.29
PL.41

- a) Passage du partiel 1 au partiel 2 en forçant le souffle, avec et sans trou d'octave (fig.29).

Il apparaît nettement que l'ouverture du trou d'octave permet un passage franc et quasi instantané de P1 à P2. L'octavation, impossible pour le DO et difficile pour le LA devient aisée lorsqu'on débouche le petit trou.

fig.30

- b) Attaques répétées du partiel 2, sans et avec trou d'octave (fig.30). Dans le cas d'attaques rapides successives il n'est pas possible d'éliminer le fondamental sans utiliser le trou d'octave. Le fondamental persiste d'ailleurs pendant les 20 ou 50 premières millisecondes de l'attaque, mais n'est plus perçu comme tel.

fig.31

- c) Emission du partiel 2 avec le trou d'octave puis rebouchage de celui-ci (fig.31).

Pour le doigté de FA (fondamental de l'instrument tous les trous bouchés) le trou d'octave est placé nettement plus haut que la moitié du tuyau. Son ouverture produit une montée sensible de la fréquence du partiel 2, ce que l'on voit bien sur l'analyse (ce partiel 2 n'est d'ailleurs pas utilisé). Pour la note LA3 (2 premiers trous ouverts) l'ouverture du trou d'octave n'affecte ni la fréquence ni l'intensité

du partiel 2 : le trou est à peu près à la place théorique. Pour le DO4 (4 premiers trous ouverts) le fait de reboucher le trou provoque la réapparition systématique du fondamental. Ce trou est très efficace, bien qu'il soit bien en deçà de la place théorique.

- Dimensions du trou d'octave : Il est généralement très petit; de l'ordre de 2 mm^2 pour la flûte à bec alto. Dans la pratique on utilise un trou de l'instrument réservé au pouce, situé au voisinage de la moitié du tuyau. On peut alors ajuster la surface du trou en le découvrant d'une plus ou moins grande quantité selon qu'il s'agit de faire octavier des fondamentaux graves ou aigus.

4) DEUX TROUS : L'UN FIXE, L'AUTRE MOBILE

§ 3.22 - Expérience

Sur le tuyau à anneaux coulissants nous disposons cette fois 2 trous de $5 \times 5 \text{ mm}$; l'un, fixe, reste à $52,5 \text{ mm}$ de l'extrémité, l'autre se déplace continûment vers l'embouchure.

Comme précédemment nous avons relevé les champs de liberté en fréquence des partiels et nous portons sur la figure la limite supérieure du champ de liberté en fonction de l'abscisse du trou mobile (fig. 32).

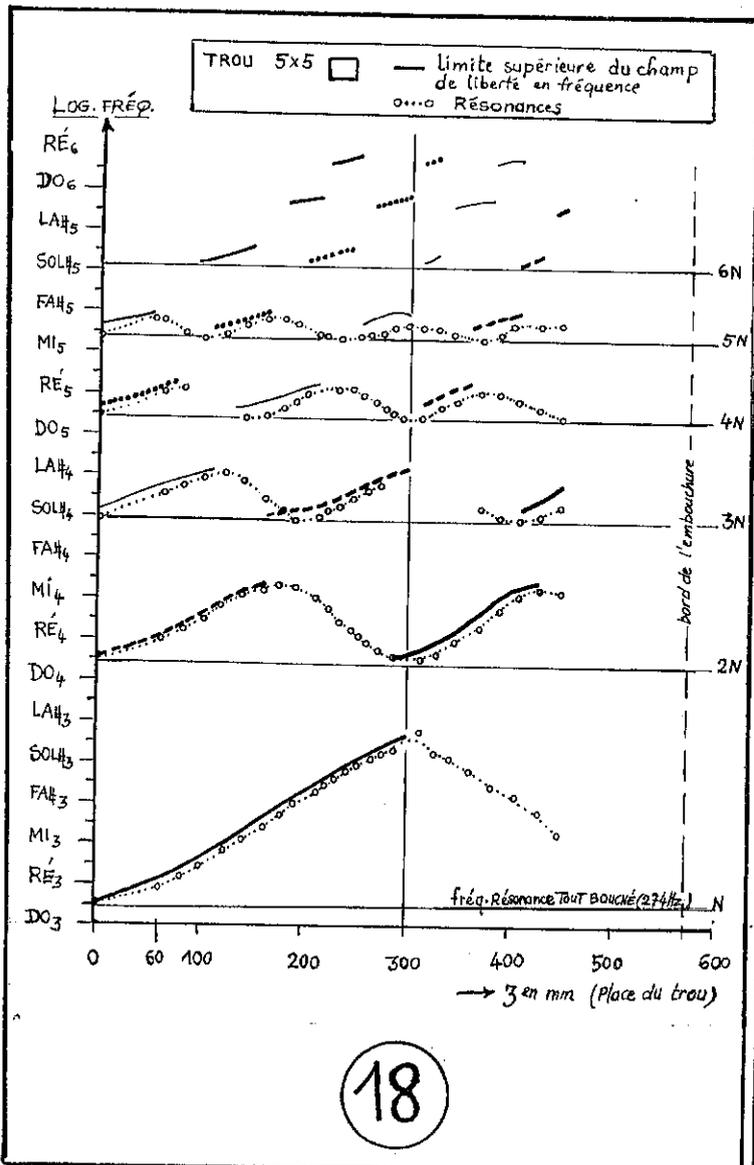
Le graphique offre un aspect assez frappant. Les courbes obtenues n'ont pas toujours une pente positive : une portion de la partie descendante des courbes de résonance est donc produite par le jet. Le trou fixe resté ouvert étant d'assez petites dimensions par rapport au diamètre du tuyau, les fréquences propres du tuyau sans trou réagissent assez fortement sur le système des partiels. C ux-ci sont donc relativement faux et l'on observe, au moment des sauts, l'émission assez fréquente de sons doubles.

Ex. : pour $z = 315 \text{ mm}$, point A, on peut obtenir LA#3 ou RE4 comme partiel 1
LA# +15 ou RE+5 comme partiel 2

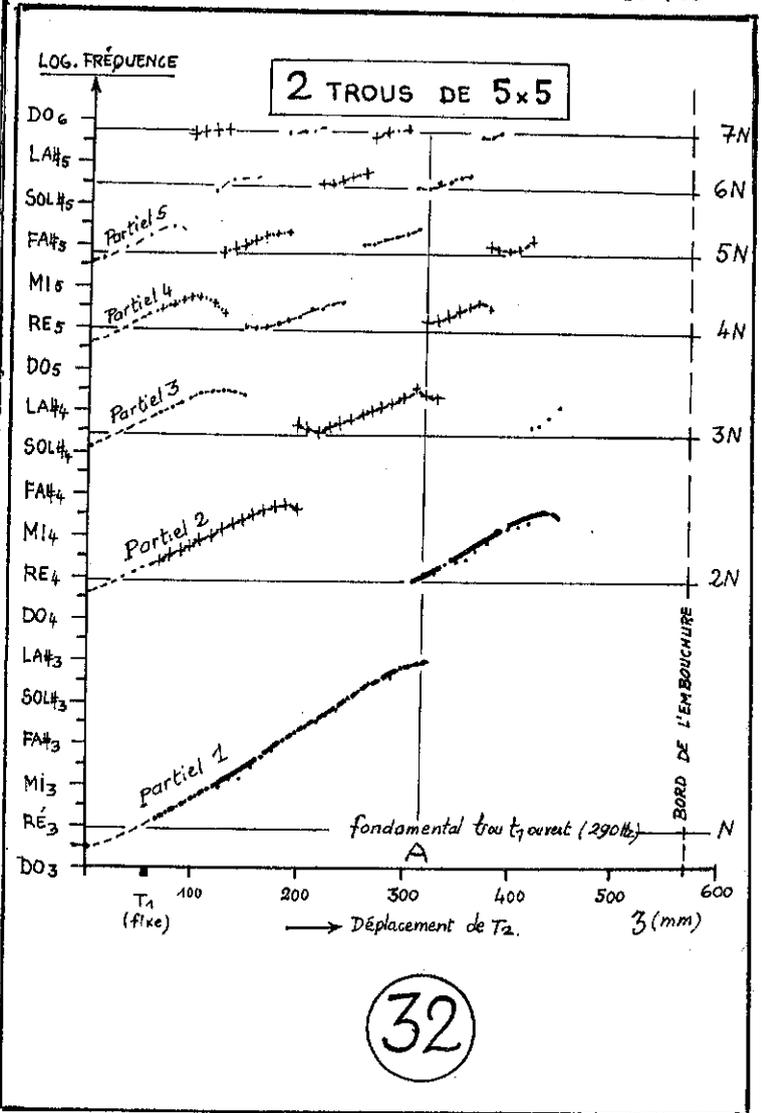
Si nous comparons maintenant les résultats de cette expérience avec l'étude du déplacement d'un seul trou de mêmes dimensions (fig.18) on constate que l'on peut pratiquement superposer les 2 graphiques à condition de faire subir au 2ème une translation des axes d'environ $+ 20 \text{ mm}$ pour l'ordonnée et $+ 20 \text{ savarts}$ pour l'abscisse. Ceci revient à dire que l'on peut ramener schématiquement le cas étudié (2 trous dont l'un fixe) à celui d'1 trou, à condition de prendre une nouvelle origine pour le tuyau (comprise entre l'extrémité ouverte et le trou fixe) et de considérer comme nouveau fondamental celui donné par le tuyau lorsque le premier trou est ouvert.

§ 3.23 - Rôle du " bout-mort ". Expérience

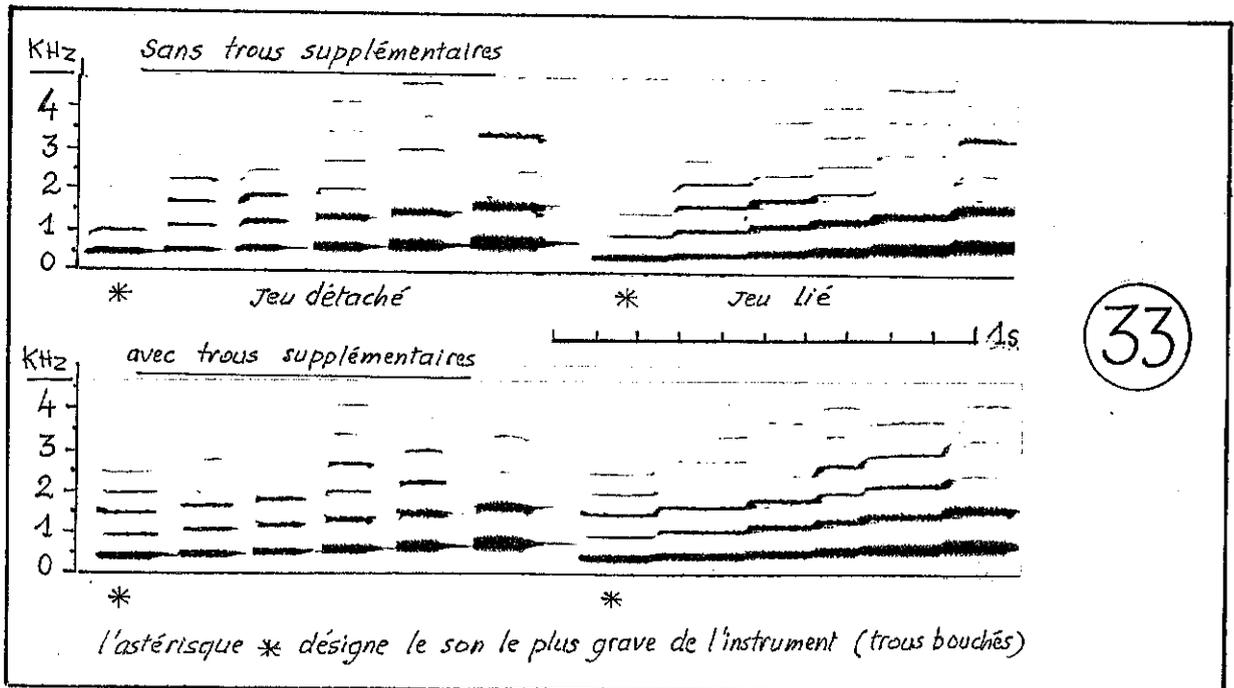
Ce que nous venons de dire pourrait inciter à conclure que la partie située au delà du trou T1, que l'on appelle le " bout-mort " du tuyau, ne joue qu'un rôle négligeable. Or ce n'est pas exact, et la preuve on est que de nombreuses flûtes traditionnelles présentent une particularité remarquable : le tuyau est percé d'un certain nombre de trous dont une partie seulement est destinée à être bouchée avec les doigts ; un ou plusieurs trous, situés en bas du tuyau restent ouverts en permanence. Celui-ci est d'ailleurs très souvent complètement bouché à l'extrémité terminale. Parmi les instruments que nous avons pu examiner, une flûte à bec de Thaïlande, une flûte à encoche chinoise, un caval turc et un caval bulgare offraient cette particularité.



18



32



33

* l'astérisque * désigne le son le plus grave de l'instrument (trous bouchés)



- expérience avec une flûte à bec de Thaïlande. voir fiche n° 5

Cette flûte à bec en bambou, quasi-cylindrique, a 8 trous destinés à être bouchés par les doigts de l'instrumentiste et 2 trous P et Q ouverts en permanence. Ces derniers, diamétralement opposés, sont situés à l'extrémité inférieure, proches d'un noeud du bambou, au dessous duquel le tuyau est coupé.

Nous avons effectué une copie de l'instrument avec un tuyau de plastique de mêmes dimensions et nous avons relevé les champs de liberté en pression des divers partiels. Puis, après avoir rebouché les deux trous P et Q, nous avons recoupé le tuyau jusqu'à ce qu'il donne le même fondamental que la flûte originale. Les relevés des champs de liberté de l'instrument copié ne montrent pas de différences très sensibles avec ou sans le bout-mort.

Il semblerait donc que les trous P et Q ne jouent pas de rôle acoustique et ne soient là que pour satisfaire certaines préoccupations numérolologique ou religieuses, ou pour permettre d'y accrocher des pompons comme le font les musiciens....

Cependant, une troisième raison, intéressante à examiner justifie l'existence de ces trous supplémentaires.

Dans la grande majorité des instruments de musique à trous ^(cylindriques) le son fondamental que l'on joue tous les trous bouchés, est plus faible et plus sourd que les autres sons. Pour éviter ce défaut on pratique alors des trous supplémentaires en bas du tuyau, prévu, de ce fait plus long. Cette technique permet également d'ajuster finement la fréquence du fondamental en agrandissant les trous supplémentaires, ce qui est plus aisé que de recouper le tuyau.

fig 33

Comparons le timbre des 6 premiers sons de la flûte thaïlandaise avec et sans les trous supplémentaires (fig.33). On vérifie bien que, dans le premier cas, les harmoniques de la note la plus grave sont plus nombreux et plus intenses, et l'ensemble plus homogène. La pratique des facteurs est donc pleinement justifiée.

5) SYSTEMES DE TROUS IDENTIQUES, EQUIDISTANTS

§ 3.24 - Généralités

Parmi les flûtes traditionnelles que nous avons examinées, nous avons été frappés par le fait que bon nombre d'entre elles avaient des trous de même surface et équidistants. Les raisons sont en fait à la fois d'ordre esthétique et pratique (simplification de la facture). On définit deux paramètres - la dimension optimale du trou et la distance entre les trous - il reste à déterminer la place du système de trous par rapport à l'embouchure.

Nous avons donc entrepris les expériences qui suivent, pour comprendre les rôles respectifs de ces divers paramètres dans le cas particulier considéré.

Nous avons utilisé le dispositif à trous rectangulaires réglables décrit précédemment et la méthode du relevé des résonances propres du tuyau en excitant celui-ci avec un haut-parleur. En plus des notations habituelles (cf. 1ère partie, fig.5) nous désignerons par p l'équidistance entre les trous; N est le nombre de trous.

A chaque expérience on détermine N , s et p ; puis le système de trous étant disposé le plus près possible de l'extrémité, on le déplace vers l'embouchure par paliers de 5 ou 10 mm en relevant, pour chaque position, les résonances du tuyau.

Nous nous intéresserons tout d'abord à la variation des fréquences de résonance en fonction de la place des trous, puis aux intervalles musicaux obtenus en débouchant 1, 2, ... N trous et à leurs modifications en fonction de la place, de la section et de la distance des trous.

§ 3.25 - 2 et 3 trous - Etude de la première résonance. Fréquence des partiels

fig.34

Plaçons tout d'abord 2 trous de section $5 \times 5 \text{ mm} = 25 \text{ mm}^2$; distants entre eux de 35 mm, et portons en ordonnée la variation de fréquence de la 1ère résonance en fonction de Y2, distance du centre du 2ème trou à l'extrémité ouverte (fig.34).

En comparant la courbe ainsi tracée (N=2) avec celle que nous avons obtenue pour un seul trou (N=1) on voit que l'écart entre ces deux courbes croît régulièrement avec Y2.

Pour Y2 = 100 mm, on relève les fréquences suivantes :

N = 2	Ré # 3 + 3s)	Intervalle 5 savarts.
N = 1	Ré # 3 - 2s)	

Pour Y2 = 200 mm, N = 2	Fa # 3 + 13s)	Intervalle 11 savarts.
N = 1	Fa # 3 + 2s)	

Reprenons la même expérience avec trois trous identiques, équidistants et portons les résultats sur la même figure; nous obtenons la courbe N = 3. Les points expérimentaux se placent, à peu de choses près, sur la courbe N = 2, du moins, pour les valeurs de Y qui nous intéressent. Dans les conditions de l'expérience, la fréquence fondamentale du tuyau ne change pas de façon importante si on ouvre un 3ème trou près de l'extrémité ouverte.

En corollaire, étant donné 3 trous ouverts, rebouchons le 1er : la fréquence n'est presque pas modifiée; rebouchons les 2 premiers, on abaisse notablement la fréquence. Nous reviendrons sur ces résultats à propos de l'étude des doigtés de fourche (cf. § 3.29).

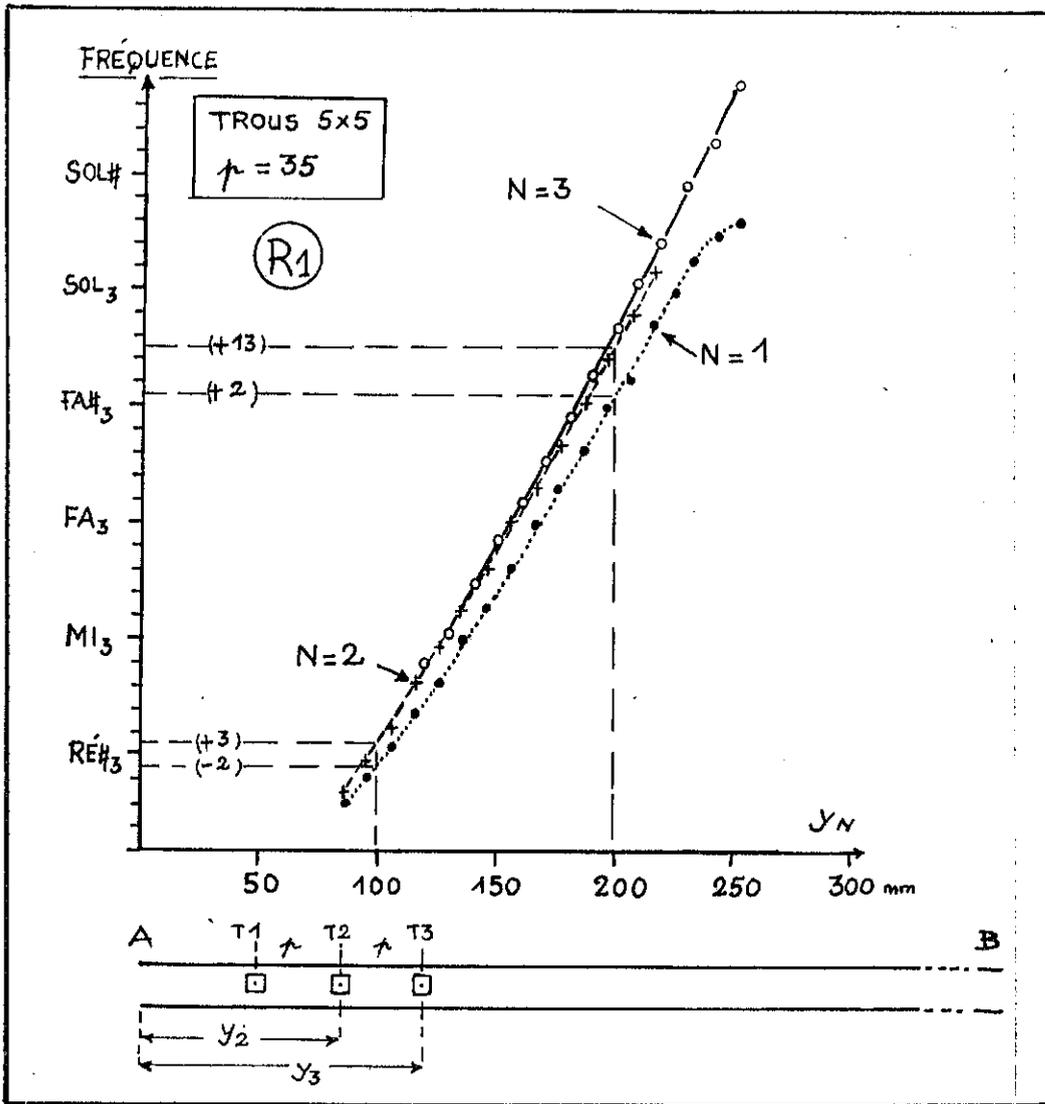
§ 3.26 - 2 et 3 trous - Etude de la 2ème résonance. Conséquences sur le timbre.

fig.35

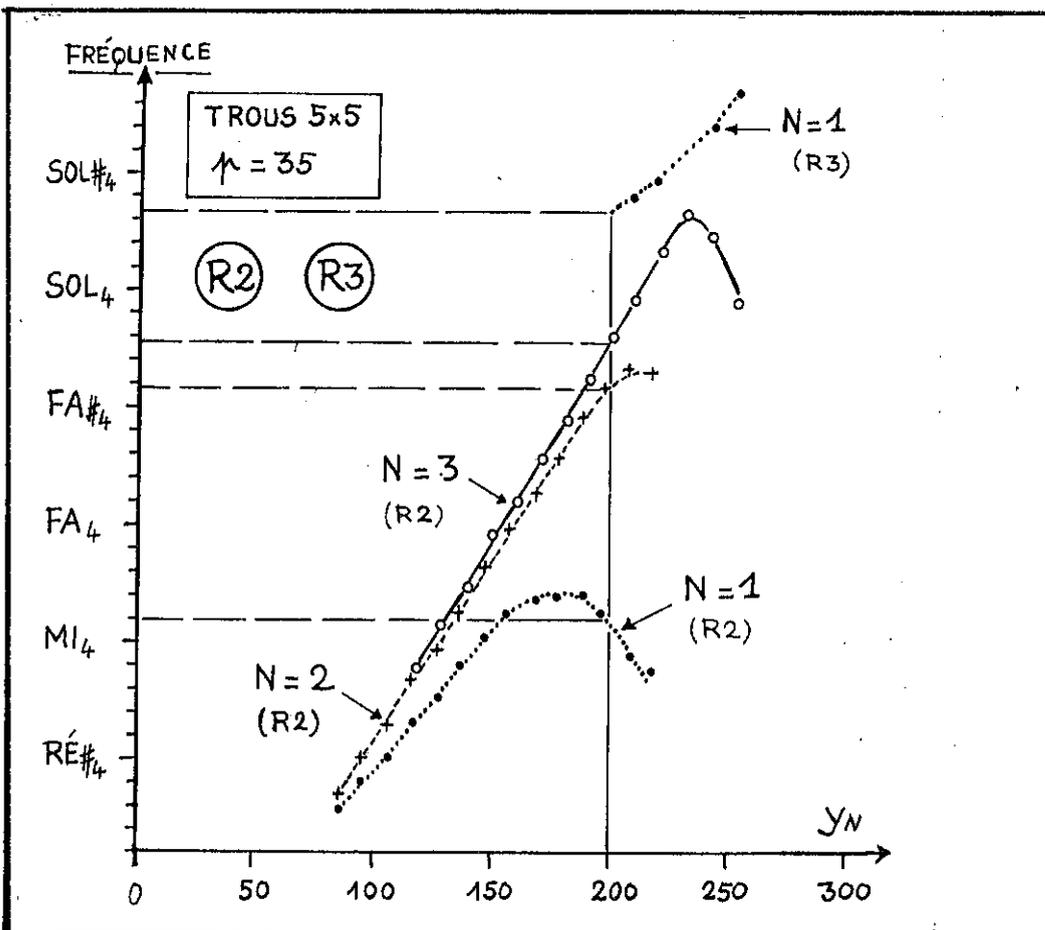
Les phénomènes sont plus compliqués pour la 2ème résonance. La figure 35 montre les résultats pour 1, 2 et 3 trous. D'une part l'écart entre les courbes 2 et 3 et la courbe 1 est beaucoup plus considérable. Donc, si nous voulons, pour une note donnée, abaisser le son du tuyau en rebouchant des trous inférieurs l'abaissement ne sera pas le même pour le partiel 1 et pour le partiel 2 du tuyau.

Rappelons cependant qu'il s'agit ici de résonances. Dans le fonctionnement normal du tuyau à bouche, les portions décroissantes des courbes de résonance ne sont pas produites, du moins en ce qui concerne les tuyaux cylindriques uniformes. Ainsi, pour $Y > 180 \text{ mm}$ ($Y/L \approx 0,3$) si nous rebouchons les 2 premiers trous, la fréquence du tuyau montera au lieu de baisser : en fait, le tuyau émettra la 3ème résonance. On comprend certains paradoxes des doigtés de fourches des flûtes, dans la 2ème et la 3ème octave.

Prenons par exemple une flûte à bec alto, modèle baroque, sur laquelle nous jouons le RE de la 2ème octave (Ré5). Les 5 premiers trous sont ouverts, et le trou d'octave partiellement débouché.



34



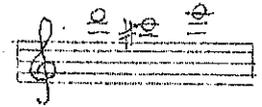
35

Rebouchons maintenant le trou N° 4 : le son baisse au $DO\sharp 5$.

Rebouchons en plus le 3ème trou, cette fois le son passe brutalement une tierce mineure plus haut et nous obtenons un $Mi5$.

Le schéma des doigtés est le suivant :

Trous N°s	1	2	3	4	5	6	7	8
$RE5$	0	0	0	0	0	/	/	0
$DO\sharp 5$	0	0	0	/	0	/	/	0
$Mi5$	0	0	/	/	0	/	/	0



0 = trou ouvert

/ = trou bouché

Le phénomène n'est paradoxal qu'en apparence : avec le 3ème doigté ($Mi5$) nous avons changé de partiel.

- Le $RE5$ est un partiel 2 (octaviation du RE , favorisée par le trou 8 partiellement débouché jouant le rôle de trou d'octave); le $DO\sharp 5$ également.

- Le $Mi5$ est un partiel 3 du fondamental $LA3$, que l'on obtient en bouchant 5 et 8. Le trou 5 joue en réalité le rôle de trou de quintoisement. D'ailleurs, ce partiel étant " lancé ", on ne le modifie pas en rebouchant 5 et 8.

En fait, si on répète cette succession de doigté mais en diminuant graduellement le souffle, on obtient au lieu du $Mi5$ un son plus bas que $DO\sharp 5$ mais faible et instable.

On vérifie par ailleurs que pour certaines valeurs de Y on peut même émettre simultanément la 2ème et la 3ème résonance et produire des sons multiples.

Indépendamment des modifications de hauteur il convient encore de tirer quelques conclusions quant au timbre des sons émis par le tuyau, en fonction des trous ouverts.

En considérant les courbes de la 2ème résonance on constate que le fait d'augmenter le nombre de trous revient à repousser vers l'embouchure les maxima des courbes; les partiels 1 et 2 sont justes pour des valeurs de Y plus grandes.

Prenons un exemple : Ouvrons un trou, dont le centre est à $Y = 200$ mm. Les résonances du tuyau sont :

$$R1 = Fa\sharp 3 + 2\text{sav.} \quad R2 = Mi4 + 5\text{s.} \quad R3 = Sol.4 + 17\text{s.}$$

Le 2ème son émis par le tuyau est, soit $R2$, trop bas d'un ton, soit $R3$ trop haut de $3/4$ de ton. L'harmonique 2 ne pouvant s'accommoder sur l'une de ces deux fréquences, aura une intensité très faible, et il y a de grandes chances pour que des partiels dissonants apparaissent à l'attaque du son.

Ouvrons un 2ème trou entre le 1er et l'extrémité A.

$$\text{On a : } R1 = Fa\sharp 3 + 13\text{s.} \quad \text{et } R2 = fa\sharp 4 + 4\text{s.}$$

L'écart entre $R2$ et l'octave juste de $R1$ n'est plus que de -9 savarts.

Ouvrons un 3ème trou entre le 2ème et l'extrémité A.

$$\text{On a : } R1 = Fa\sharp 3 + 13\text{s.} \quad \text{et } R2 = fa\sharp 4 + 13\text{s.}$$

Cette fois le tuyau octaviera juste. On peut prévoir dès lors que le fondamental aura une attaque dépourvue de bruits parasites et que l'harmonique 2 sera intense.

Nous retiendrons donc que le fait d'ouvrir un 3ème trou près de l'extrémité ouverte, s'il ne change pas notablement la fréquence du fondamental, en modifie plus ou moins le timbre.

Le "bout-mort" est donc mal nommé. Dans certaines méthodes de flûte à bec on recommande de laisser le plus souvent possible le 4ème doigt de la main droite (2ème trou) en place, pour soutenir l'instrument. Il faut savoir que l'on produit ainsi une modification du timbre de l'instrument.

§ 3.27 - 1 à 5 trous identiques, équidistants.

Reprenons le même type d'expérience, mais disposons maintenant 5 trous de grande surface, 5 x 20, équidistants de 50 mm.

Nous relèverons les fréquences de résonance du tuyau pour N=1, N=2 ... N=5. Portons sur un même graphique les fréquences de résonance en ordonnée, et YN en abscisse (distance du Nième trou à l'extrémité A).

fig.36 Pour chaque groupe de N trous nous obtenons des portions de courbes qui se raccordent bien les unes aux autres (fig.36). La courbe résultante ne diffère pratiquement pas de la courbe obtenue pour un seul trou, car les trous sont grands par rapport à la section du tuyau $s/S = 0,4$.

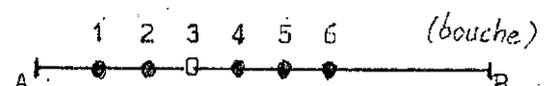
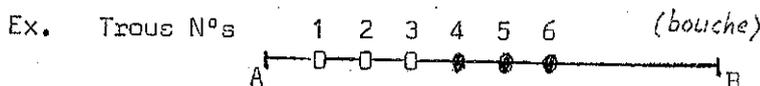
fig.37 La fig.37 permet de comparer les résultats pour deux types de trous : 5 x 20 et 5 x 5.

Bref, le fait d'augmenter le nombre de trous découverts équivaut à agrandir la surface du trou le plus proche de l'embouchure : les partiels se rapprochent des harmoniques du fondamental, la partie de tuyau située au delà des trous (bout-mort) joue un rôle négligeable sur la fréquence; corrélativement, le son du fondamental du tuyau est plus intense et plus riche en harmoniques.

A partir des résultats de ces expériences nous allons pouvoir développer maintenant quelques considérations sur les doigtés de fourche des flûtes.

§ 3.28 - Les sons de fourche. Définitions

Un des buts du musicien est d'obtenir, avec un instrument donné le plus grand nombre possible de sons différents en hauteur et en timbre. En dehors des sons de base (sons fondamentaux de l'instrument) produits en débouchant successivement tous les trous, en commençant par le trou le plus éloigné de l'embouchure, on peut utiliser des sons de fourche pour lesquels un ou plusieurs des trous inférieurs au trou ouvert restent bouchés.

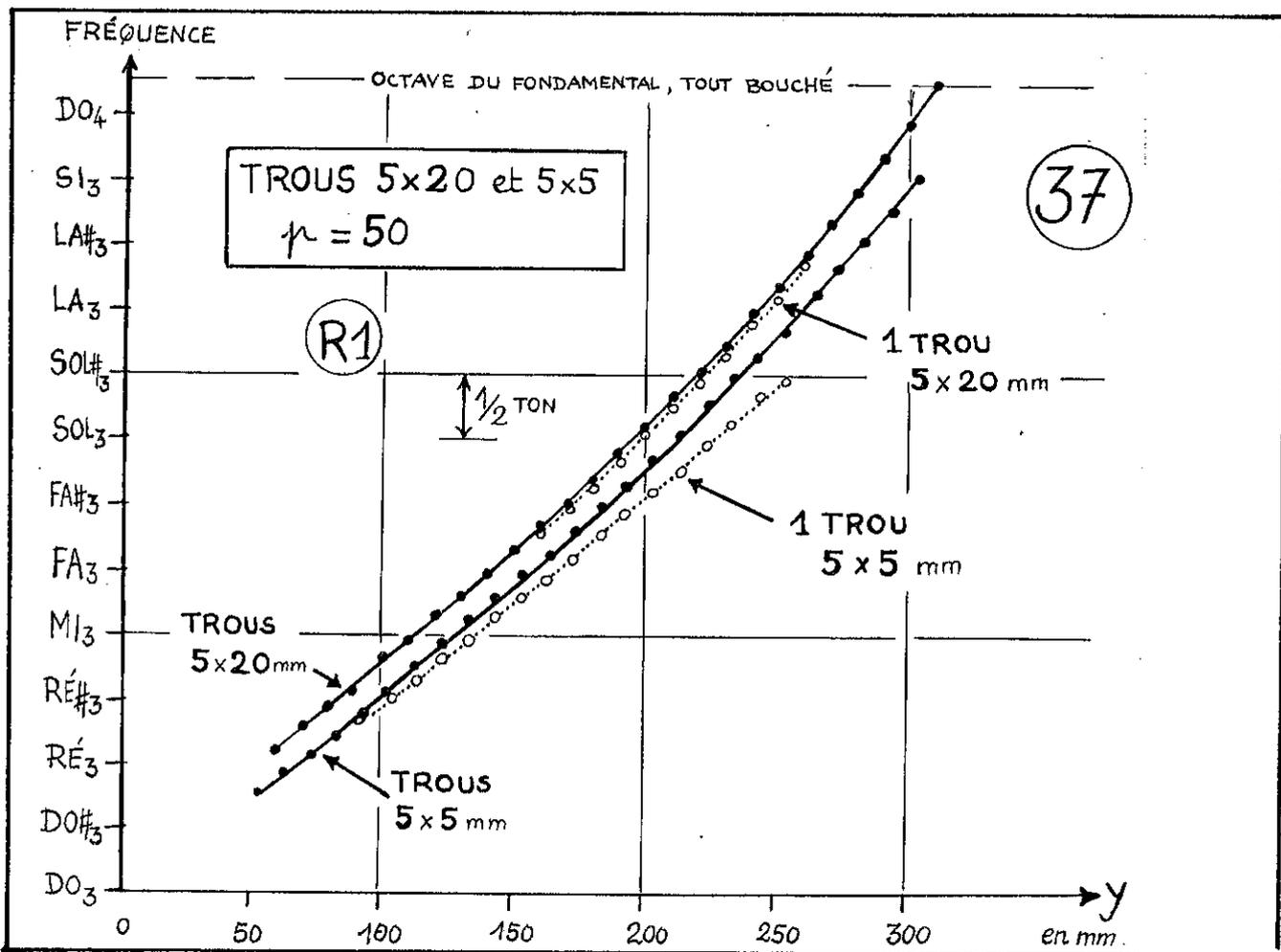
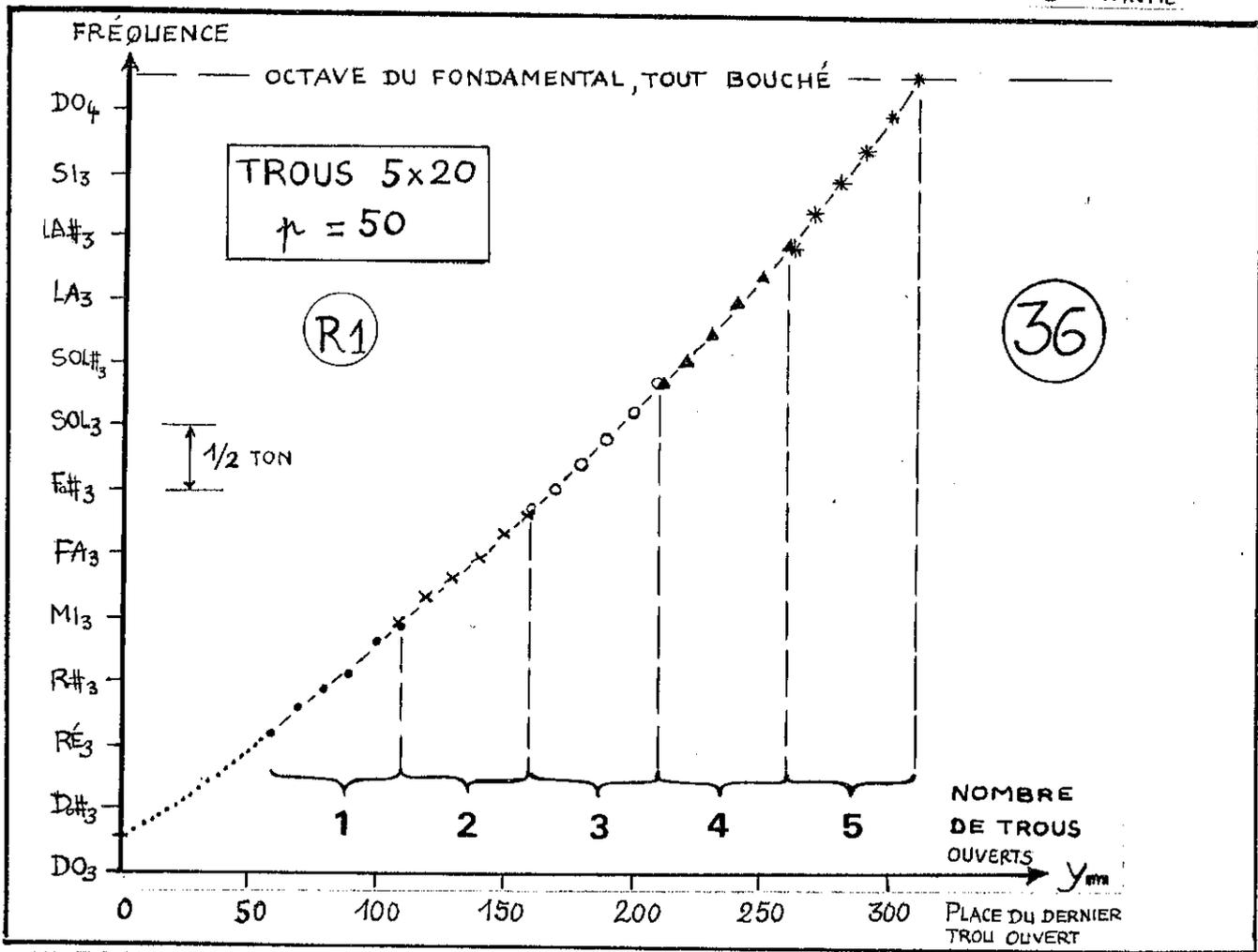


Son de base - Quand un trou quelconque est débouché, les trous d'ordre inférieur le sont aussi.

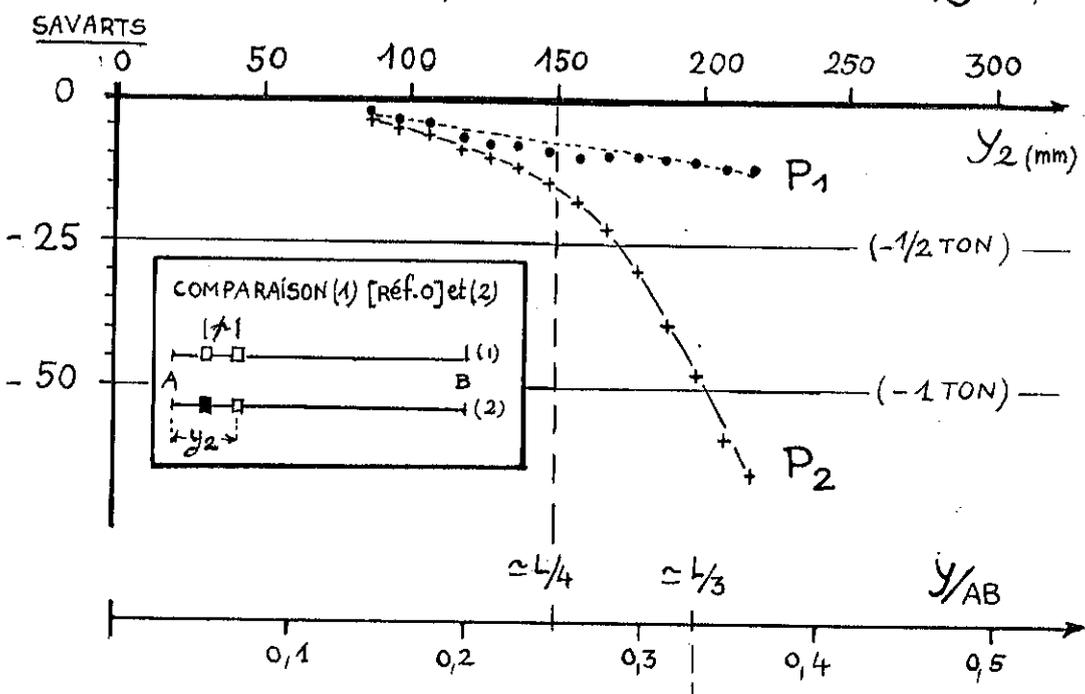
Son de fourche - Quand un trou quelconque est débouché, des trous d'ordre inférieur restent bouchés.

trou bouché ●
trou ouvert ○

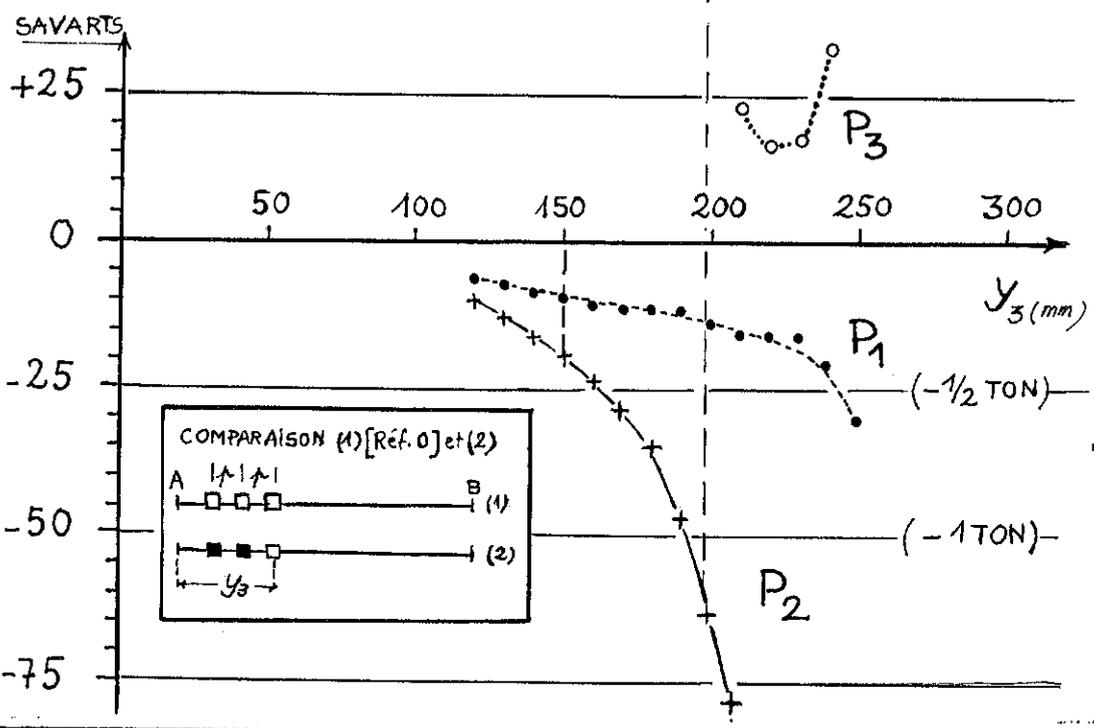
....!



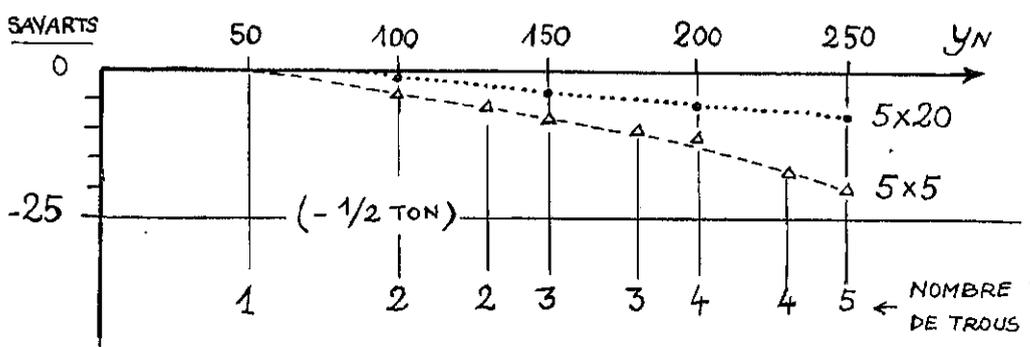
TRous 5x5 $\mu=35$ AB=596 D=18 $\delta/S \approx 0,1$



38a

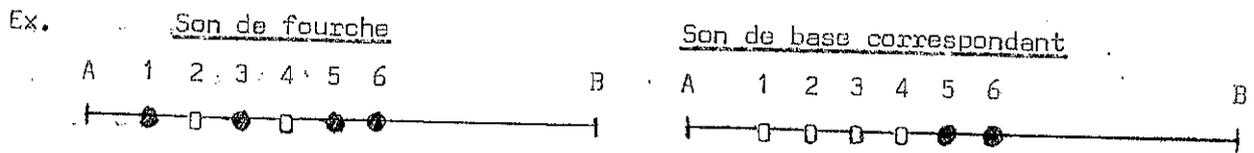


38b



39

Dans le jeu normal de la flûte, les combinaisons de trous ouverts ou fermés sont parfois fort complexes. Mais on sait que le dernier trou ouvert (le plus proche de l'embouchure) détermine en grande partie la fréquence fondamentale. Il est donc commode de regrouper les diverses combinaisons de fourches ayant ce trou en commun et de comparer les résultats avec ceux du son de base correspondant.



L'étude des sons de fourche se ramène alors à préciser les effets du recouvrement des trous inférieurs, sur la fréquence et le timbre des sons ainsi obtenus.

§ 3.29 - Fréquence et timbre des sons de fourche. Doigté moderne et baroque des flûtes à bec .

fig.38 A partir des figures 34 et 35 nous pouvons calculer pour chaque valeur de Y, la différence des ordonnées des courbes N=2 et N=1 pour chaque résonance. Portons cette différence en ordonnée, et en abscisse Y; nous obtenons le graphique de la fig.38. Opérons de même avec les courbes N=3 et N=1. On lit ainsi directement l'abaissement qui se produit lorsqu'on rebouche 1 ou 2 trous lors d'un doigté de fourche, et l'on voit comment varie cet abaissement en fonction de la place du trou resté ouvert (Y2 dans le cas de 2 trous, Y3 dans le cas de 3 trous).

fig.39 De la même façon, nous tirons de la fig. 39 les courbes comparatives pour deux dimensions différentes des trous.

On voit clairement que l'abaissement est d'autant plus important que l'on recouvre beaucoup de trous inférieurs, et que le trou principal est plus près de l'embouchure. On constate aussi que l'abaissement est en raison inverse de la surface des trous.

Sur un instrument de 6 ou 8 trous, les 2 premiers trous sont généralement placés vers le 1/4 inférieur du tuyau. Le fait de reboucher le 1er trou n'abaisse le son que de 5 à 6 savarts, (1/5 de demi-ton). Si le 1er trou est de grande section l'abaissement pourra être plus important, mais on ne rencontre généralement pas ce cas dans la pratique. Avec le partiel 2, l'abaissement est quasiment double, mais n'atteint toujours pas le 1/2 ton.

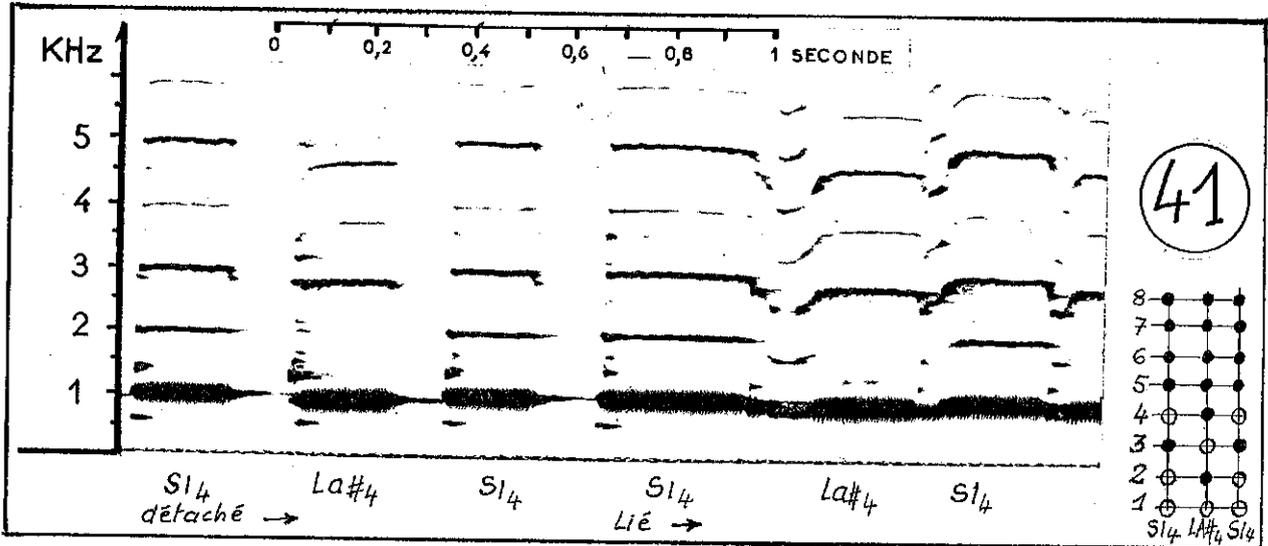
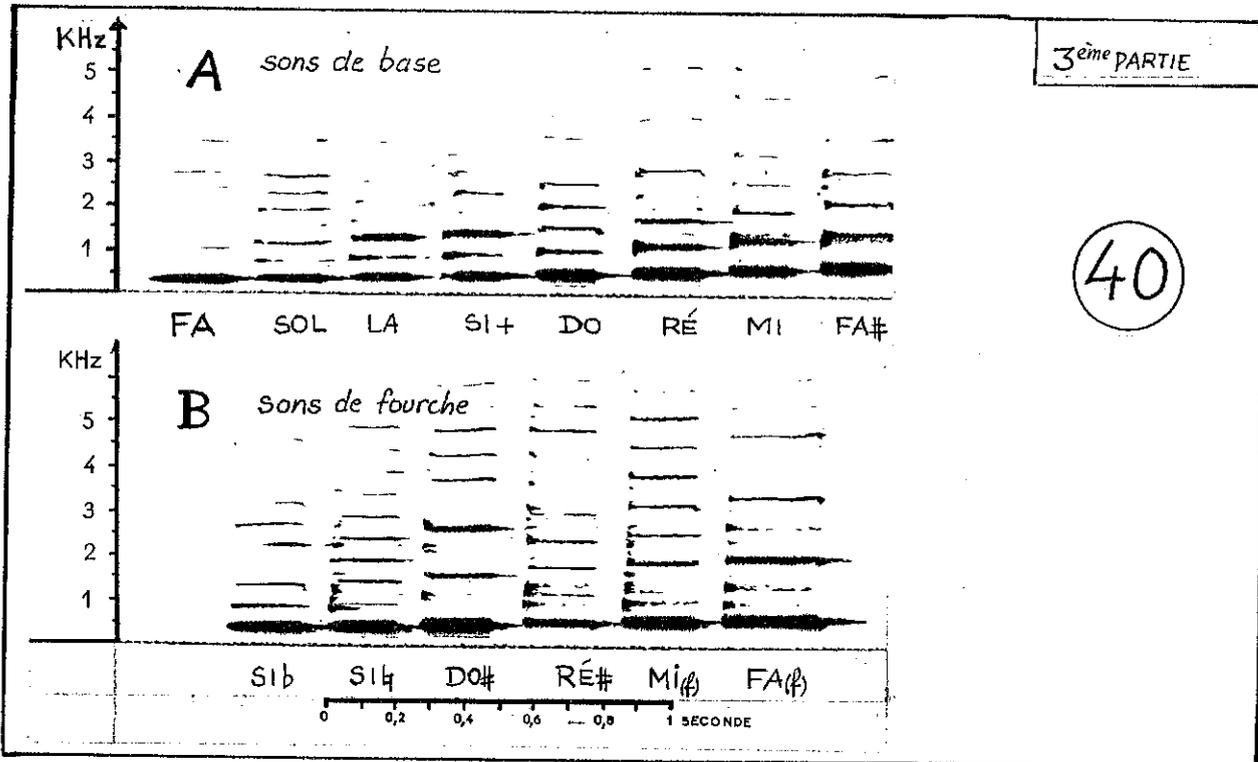
Ceci explique pourquoi sur la flûte à bec baroque, les facteurs ont été conduits à percer le 2° trou sous forme d'un trou double, pour faire le demi-ton intermédiaire entre la 2ème et la 3ème note de la flûte.

Le 3ème trou ne se trouve généralement pas plus haut que le 1/3 inférieur du tuyau. On voit fig. 38b que l'abaissement atteint tout juste le 1/4 de ton pour le partiel 1; sur le partiel 2, par contre, l'abaissement varie beaucoup avec la place du 3ème trou et peut passer d'1/2 ton à 1 ton.

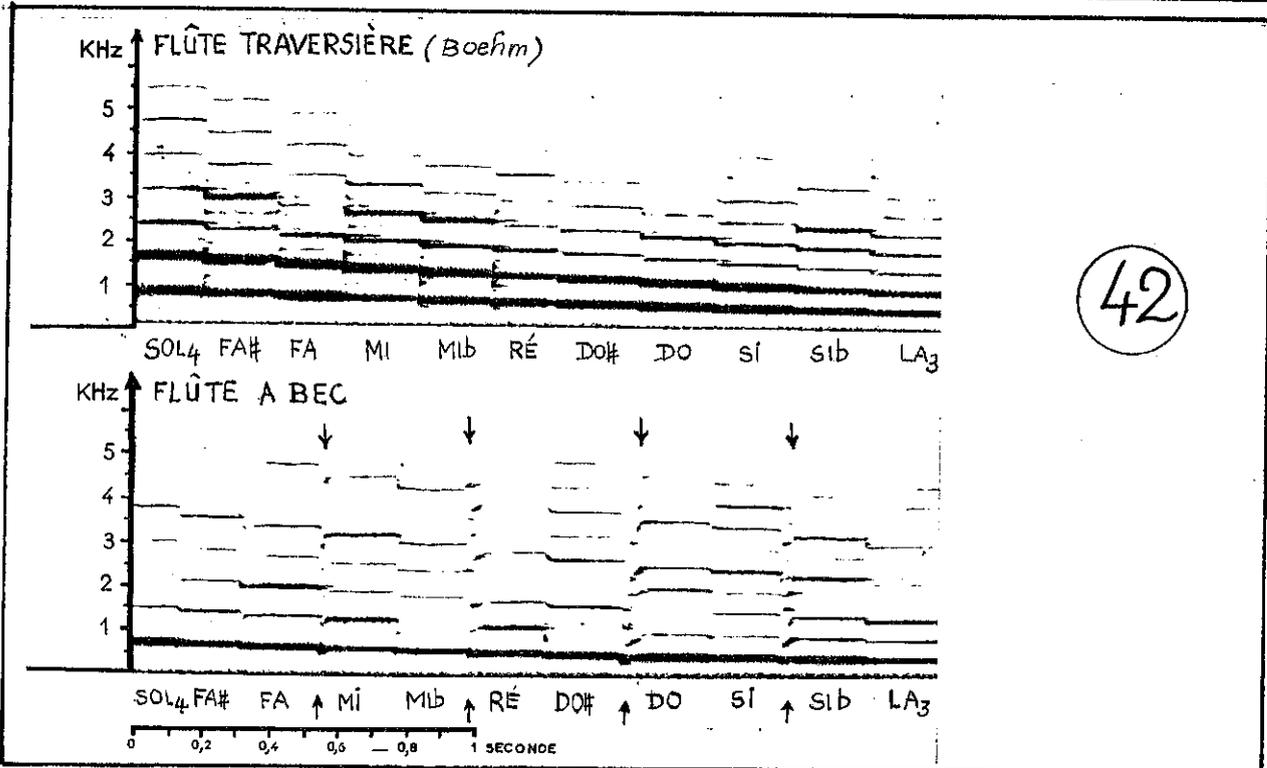
Avec 4 trous nous pouvons utiliser la fig.39, courbe 5 x 5. On voit qu'en rebouchant les trois premiers trous le son ne varie que de 12 à 17 savarts ce qui ne fait toujours pas un demi-ton.

Ces considérations vont nous permettre de comprendre l'intérêt du doigté baroque des flûtes à bec par comparaison avec le doigté dit moderne.

40



41



42

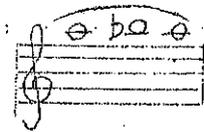
Indépendamment de la composition harmonique, le sonagramme nous fournit encore des renseignements sur les attaques. Ainsi, nous pouvons remarquer l'importance et le nombre des partiels d'attaque des sons de fourche. Même si ces partiels sont de brève durée (ici de 20 à 30 ms), il n'en sont pas moins perçus comme bruits désagréables. Ces partiels persistent souvent dans le son tenu, mêlés aux bruits d'écoulement, et se superposent aux harmoniques. On en remarque aussi pour les sons fondamentaux de l'instrument, mais en moins grand nombre et de plus faible intensité.

En réglant convenablement le coup de langue on peut éliminer presque complètement les partiels d'attaque, mais les sons de fourche n'en restent pas moins sourds et creux du fait de la faiblesse de l'harmonique 2.

Nous aurions pu prévoir ce résultat en nous référant aux remarques exposées § 3.25 où nous avons vu que le fait de reboucher les trous inférieurs accroît l'inharmonicité des partiels : c'est bien le cas des sons de fourche.

En jeu legato d'autres phénomènes apparaissent qui sont particuliers au timbre des sons de fourche, et qui proviennent des "doigtés croisés" (cross-fingering). Prenons pour exemple l'enchaînement de doigtés suivant :

N° des trous →	1	2	3	4	5	6	7	8
LA ₄	0	0	•	•	•	•	•	•
Sib ₄	0	•	0	•	•	•	•	•
LA ₄	0	0	•	•	•	•	•	•



Flûte à bec alto

ROCKSTRO s'étonne du fait que les pianistes arrivent à une grande virtuosité en articulant les doigts par mouvements contraires, alors que sur la flûte les résultats sont bien plus mauvais (§ 3.73). La raison en est simple :

Si deux doigts ne s'appliquent pas exactement au même moment sur les touches d'un piano on entend tout au plus un léger décalage dans les notes de l'accord. Mais sur un instrument à vent, pendant le très court instant où un doigt se lève trop tôt ou au contraire s'abaisse trop tôt on crée, en jeu legato, le son correspondant au doigté intermédiaire.

fig.41 Ces sons intermédiaires sont parfaitement perçus comme parasites; on les voit très bien sur le sonagramme (fig.41). L'entraînement sur un tel instrument consiste donc à éliminer le plus possible les mauvaises liaisons, d'une part en acquérant plus de sûreté et de virtuosité dans les doigtés, d'autre part en coordonnant certains types d'articulation de la langue avec les mouvements des doigts.

fig.42 Voici à titre d'exemple la figure 42 donnant la comparaison entre une gamme chromatique jouée sur la flûte à bec alto modèle baroque et sur une flûte traversière modèle Boehm. Sur ce dernier instrument, grâce à l'augmentation du nombre des trous et à la mécanique élaborée, les doigtés croisés ont pu être complètement éliminés. Il est aisé de jouer correctement une gamme chromatique, même sans une grande pratique de l'instrument. On remarque que la transition d'un son à l'autre est toujours franche et que le timbre est homogène, quel que soit le son joué.

Au contraire, sur la flûte à bec, les "parasites" de transition entre certaines notes (FA₄ - MI₄ ou MI_b - RE etc...) se lisent très clairement; il apparaît aussi que le timbre est assez hétérogène, du moins pour l'instrument employé ici.

§ 3.31 - Intervalles musicaux obtenus en débouchant les trous successivement

Toujours avec le même dispositif à trous rectangulaires réglables et la méthode du relevé des résonances propres du tuyau en excitant celui-ci avec un haut-parleur, nous avons fait trois séries d'expériences portant sur 5 trous :

équidistance des trous	dimensions des trous	section	$\frac{S}{S}$ Section d'un trou / Section du tuyau
$p = 50 \text{ mm}$	5×20	$s = 100 \text{ mm}^2$	$\frac{100}{255} = 0,4$
$p = 50 \text{ mm}$	5×5	$s = 25 \text{ mm}^2$	$\frac{25}{255} = 0,1$
$p = 25 \text{ mm}$	5×5	$s = 25 \text{ mm}^2$	$\frac{25}{255} = 0,1$

A chaque position du système de trous on relève les résonances, d'abord tous les trous bouchés, puis le 1er trou ouvert, puis 1 + 2, 1 + 2 + 3 ... etc... jusqu'à 5.

Soient deux états successifs des trous du tuyau :

1) $T_1 + T_2 + T_3$ ouverts

2) T_1 ouvert

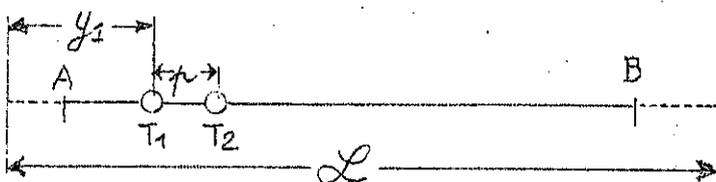
Nous conviendrons de désigner par $T_1 + T_2 + T_3 / T_1$ l'interval musical formé par le rapport des fréquences mesurées dans ces deux cas. T_0 signifie que tous les trous sont bouchés.

En facture instrumentale la place du 1er trou est relativement plus importante car elle conditionne en grande partie celle des autres. Dans cette optique, nous repèrerons dans les expériences qui vont suivre la place des trous, par l'abscisse y_1 du 1er trou, quel que soit le nombre de trous découverts. Les trous étant équidistants on calculera facilement celle du Nième trou : $y_N = y_1 + (N - 1) p$.

Portons y_1 en abscisse, et, en ordonnée, les intervalles T_1/T_0 , $T_1 + T_2/T_1$, $T_1 + T_2 \dots T_N/T_1 + T_2 + \dots T_{(N-1)}$ produits en débouchant les trous successivement. On obtient les graphiques des figures 43 a, b et c pour chaque série d'expérience.

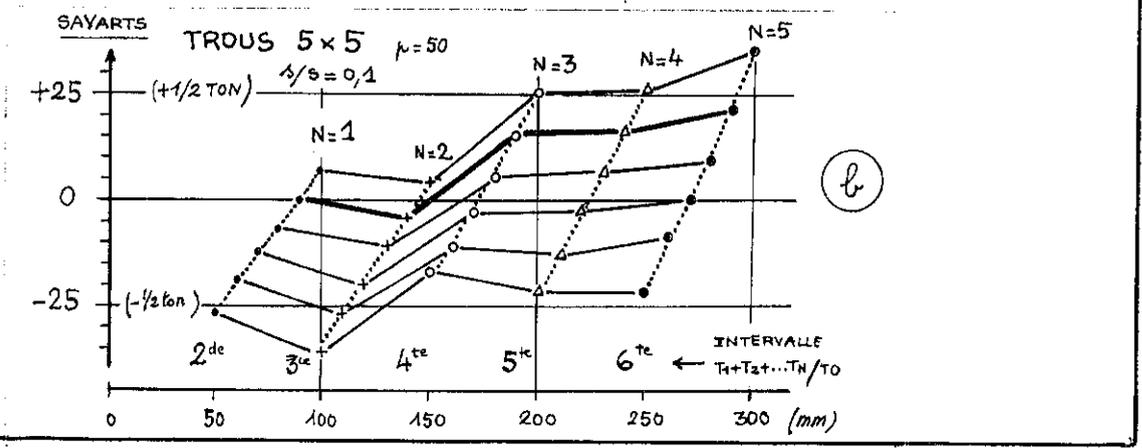
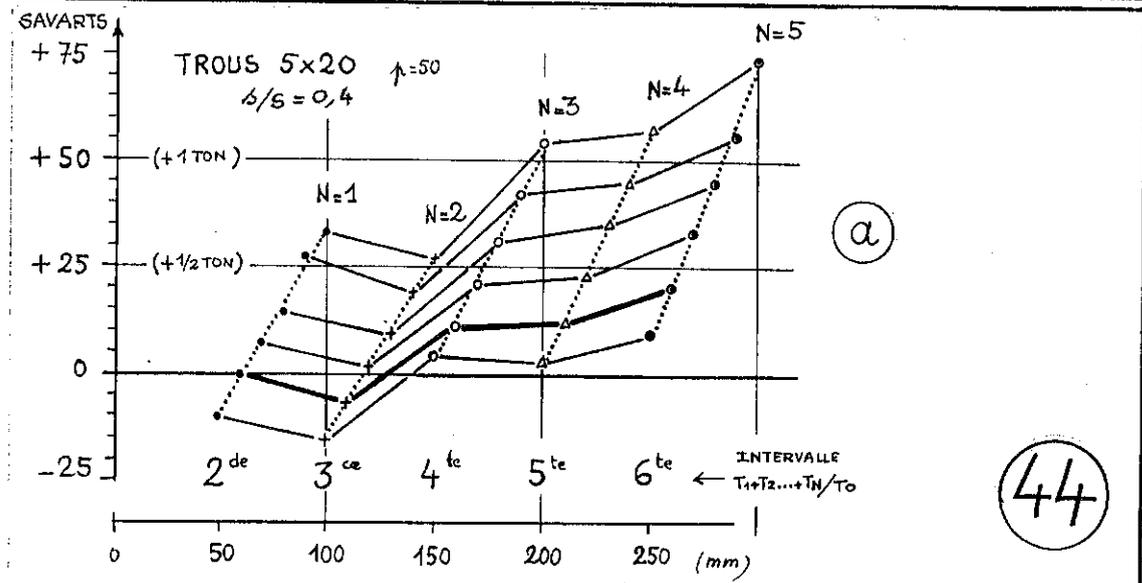
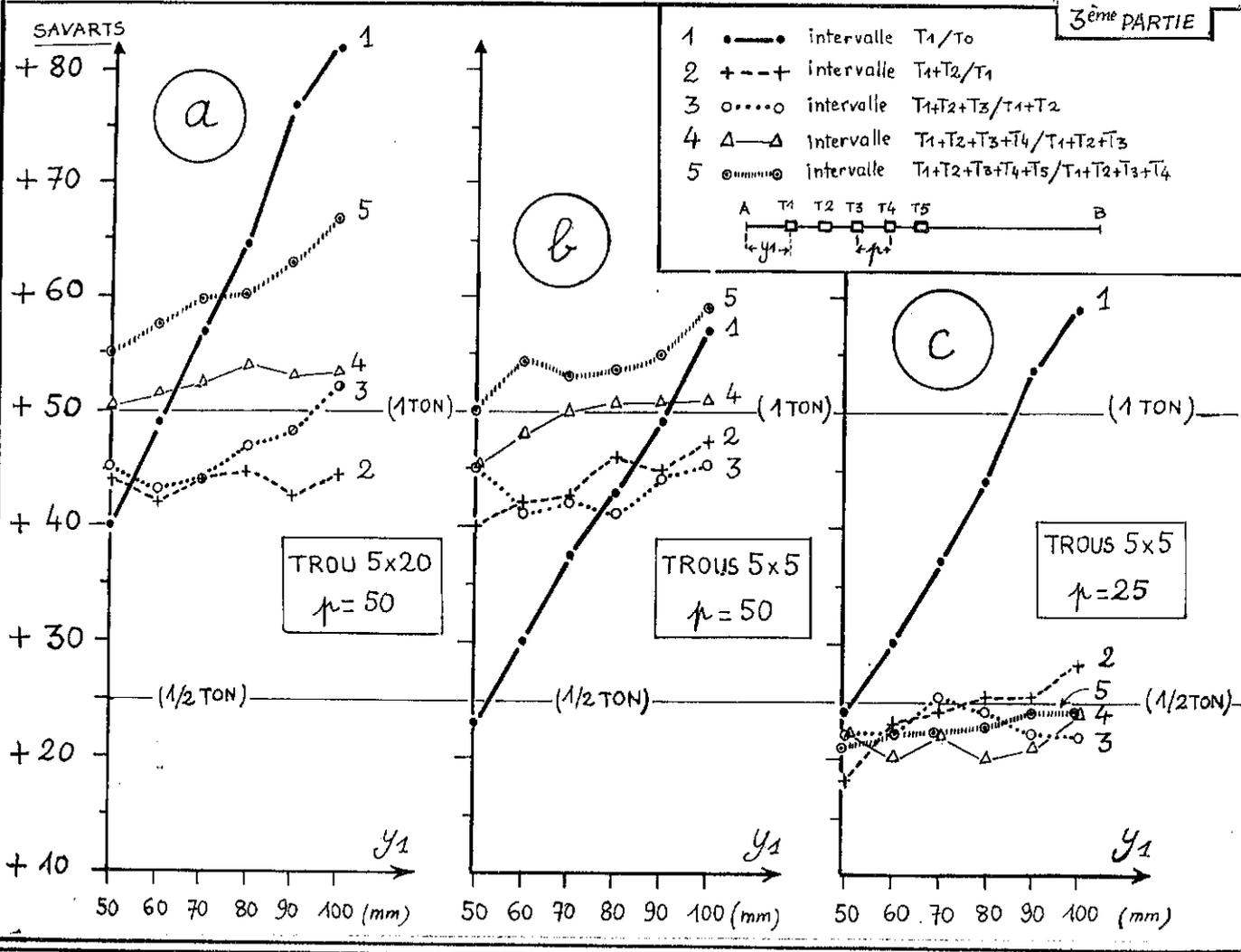
fig.43
abc

Il apparaît instantanément que l'interval T_1/T_0 varie très sensiblement avec la place de T_1 . Il n'en est pas de même pour les autres. L'explication schématique est la suivante.



Quand les trous se déplacent vers l'embouchure, s et p étant constants, la fréquence obtenue en débouchant T_1 croît avec le rapport y_1/L , c'est à dire avec y_1 puisque L est constant.

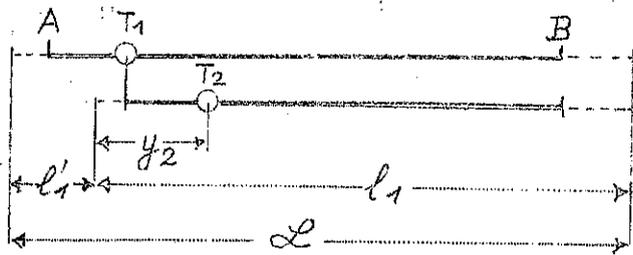
Examinons maintenant l'interval $T_1 + T_2/T_1$.



43

44

Le trou T_1 restant ouvert on peut considérer que la longueur acoustique du tuyau est limitée en un point donné entre T_1 et l'extrémité. Appelons l_1 cette nouvelle longueur. La fréquence obtenue en débouchant $T_1 + T_2$ dépend du rapport



y_2 / l_1 . Or cette fois, y_2 est à peu près constant et l_1 diminue avec le déplacement des trous vers B. L'intervalle, $T_1 + T_2 / T_1$

croît très peu et de façon assez irrégulière (courbes 2 de la figure 43). En effet, selon les rapports de longueur entre l_1 , portion du tuyau située au delà des trous, et L on observe des attirances de fréquence plus ou moins marquées : la correction qu'il faut admettre pour définir l_1 n'est donc pas constante. Ceci explique l'aspect irrégulier des courbes 2 et 3 plus particulièrement.

Il est intéressant de remarquer que pour une équidistance donnée, le diamètre des trous ne modifie que très peu les intervalles musicaux obtenus en débouchant les trous successivement, à partir du 2ème trou (fig. 43 a et b). Ces intervalles se situent entre 40 et 60 savarts, donc proches d'un ton. Cette expérience nous permet de comprendre la pratique d'un fabricant de quena qui, ayant déterminé la place des trous (donc p) et ouvert le trou supplémentaire Q, perce en même temps les 6 trous qu'il agrandit peu à peu par tâtonnement, tout en jouant l'instrument. Un facteur européen ouvre les trous les uns après les autres (en partant du bas) en contrôlant au fur et à mesure la justesse des intervalles. Elle montre également l'intérêt du trou supplémentaire, Q, qui permet de s'affranchir de la position du système de trous sur le tuyau.

Si, avec des trous de même surface (5 x 5) nous ramenons l'équidistance de 50 à 25 mm, fig. 43 b et c, ces intervalles se situent entre 20 et 30 savarts, proches du demi-ton. Indépendamment de la hauteur absolue, c'est donc la place des trous, (ici la distance inter-trous) qui est déterminante. Pour la construction d'un instrument traditionnel du type "trous égaux équidistants", les deux seules données importantes à connaître sont le rapport L/p (ou p/L) et la situation de l'un des trous sur le tuyau.

Supposons par exemple que nous voulions construire une flûte à 5 trous identiques et équidistants, donnant au mieux les six premiers sons d'une gamme majeure tempérée, c'est-à-dire

	Ton	Ton	1/2 ton	Ton	Ton	...	← Intervalles successifs
0	(50)	1	(50)	2	(25)	3	← N°s des trous
Do		Ré		Mi		Fa	← savarts (entre parenthèses)
		2de		3ceM		4te	← noms des notes
		(50)		(100)		(125)	← Intervalles T_1/T_0 ;
						(175)	← $T_1+T_2/T_0, T_1+T_2+T_3/T_0$ etc..
						(225)	← savarts (entre parenthèses)
						5	
						La	

A partir de la fig.43 nous pouvons lire, pour chaque valeur de Y_1 l'écart d'une courbe donnée par rapport à l'intervalle de référence qui sera 50 savarts pour les courbes 1,2,4 et 5 et 25 savarts pour la courbe 3.

Ex : courbe 1 (fig. 43a) quand Y_1 varie de 50 à 100 mm nous lisons successivement -10; -1; +6; +14; +26; +33. Plaçons ces points sur un graphique portant des savarts en ordonnée et Y_1 en abscisse (fig. 44a). L'échelle de fréquence étant plus réduite que dans la figure précédente on peut relier les points par une droite inclinée (en pointillé).

Reprenons la fig. 43a. En additionnant algébriquement, pour chaque valeur de Y_1 , les écarts de la courbe 1 à 50 savarts et ceux de la courbe 2 à 50 savarts, on ob-

tient une deuxième série de points que nous porterons, figure 44a aux abscisses $Y_1 + 50$ mm. Ces points correspondent aux deux premiers trous ouverts ($N=2$). Nous pouvons aussi les relier par une droite. Répétons l'opération jusqu'au 5ème trou.

Joignons maintenant les points obtenus pour chaque position du système de trous; nous obtenons des lignes brisées placées les unes au dessus des autres.

fig.44b

En procédant de la même façon nous traçons la figure 44b à partir de la fig. 43b (trous 5×5 ; $p = 50$).

Quelles que soient la place et la dimension des trous nous voyons bien que le problème que nous nous étions proposé est insoluble !

Fig. 44a, si nous plaçons le 1er trou à 60 mm de l'extrémité nous avons bien un ton entre le fondamental et le 1er trou; mais en ouvrant le 2ème trou, l'intervalle $T_1 + T_2/T_1$ que nous obtenons est plus petit que le ton (3ce trop basse). Par contre, entre le 2ème et le 3ème trou, l'intervalle est bien supérieur au $1/2$ ton (d'où une 4te trop grande).

On rencontre fréquemment des échelles de ce genre sur les instruments populaires, comme nous le verrons.

fig.43c

Une autre façon de résoudre le problème consiste à choisir une équidistance plus petite (fig.43 c) ce qui donne des $1/2$ tons entre les trous successifs. Pour jouer un intervalle d'un ton, on " saute " un trou en le laissant bouché. On rencontre généralement ce système sur des flûtes de grande longueur 600 à 800 mm, et de taille fine. L'écartement des trous se situe entre 25 et 30 mm ce qui est confortable pour le musicien. Seulement, à moins de disposer d'une cléserie appropriée, comme c'est le cas sur la flûte traversière occidentale, il n'est guère possible de multiplier les trous au delà de 8; c'est pourquoi les fondamentaux de ces instruments ne couvrent pas plus d'une quinte ou d'une sixte mais comme ce sont des flûtes du type " flûtes à partiels ", l'étendue effective est beaucoup plus considérable (cf. lay, caval bulgare, flûte longue Hongroise).

§ 3.32 - Deux exemples de flûtes à trous identiques et équidistants : la flûte à bec de Thaïlande et le caval Bulgare.

fig.45

Ces deux instruments possèdent huit trous chacun et se rattachent aux deux catégories différentes que nous venons de voir. Les indications principales sur les dimensions et la place des trous sont données figure 45. Pour plus de détail on voudra bien se reporter aux fiches correspondantes (fiche n°5, 4^{ème} partie). La longueur de chaque instrument est ramenée à 1.

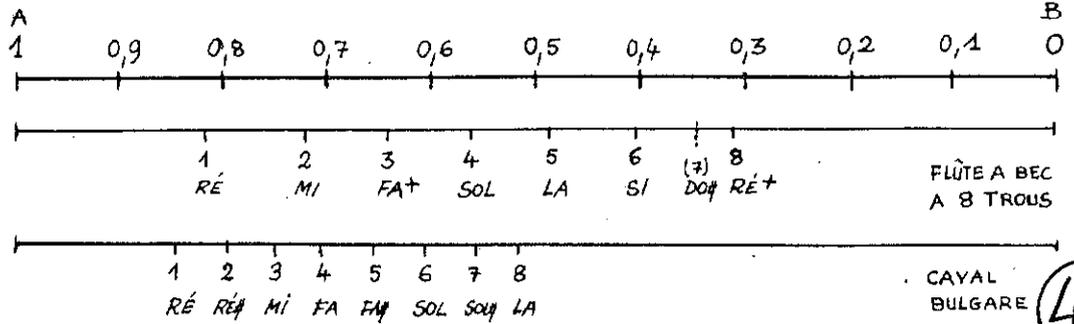
- La flûte à bec de Thaïlande possède un " bout-mort ". Pour estimer la longueur utile du tuyau nous avons fait une copie de l'instrument, sans les trous supplémentaires, et nous l'avons raccourcie jusqu'à ce que nous obtenions le même fondamental. Nous avons procédé de la même façon pour le caval bulgare qui offre la même particularité.

fig.46

On voit que la flûte à bec est du type flûte à tons successifs. Par convention appelons DO, le son le plus grave de l'instrument, tous les trous bouchés. Comme sur la figure 44a, on remarque une tierce basse (Mi-), une quarte un peu grande (Fa+), les autres intervalles ne s'agrandissant pas autant que dans notre expérience car les trous sont proportionnellement plus petits sur cette flûte. A l'aide de quelques fourches deux modes pentatoniques viennent aisément sous les doigts. On peut en trouver d'autres... (fig.46).

...../

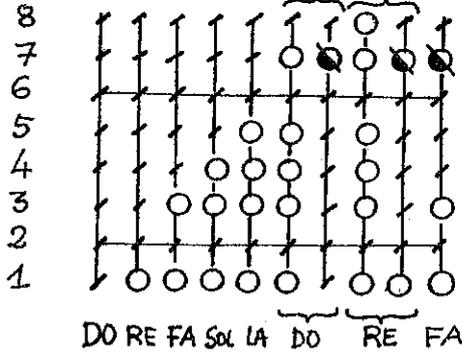
$\frac{L}{D}$	$\frac{L}{r}$	$\frac{r}{L}$	ϵ
16	11,5	0,19	4,5
388	213	0,32	3



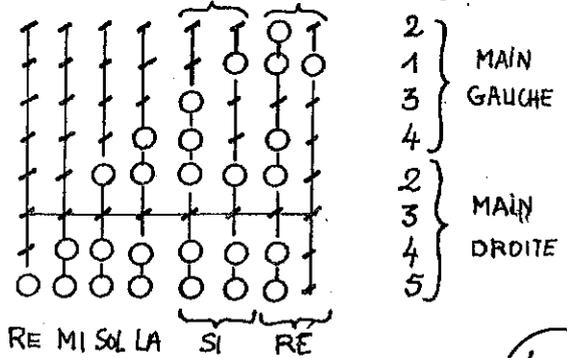
45

FLÛTE A BEC A 8 TROUS (Thaïlande)

N^{os} TROUS



N^{os} doigts

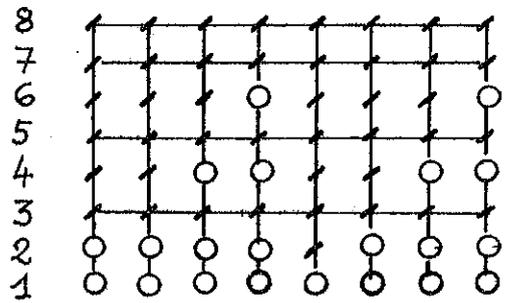


○ TROU OUVERT / TROU FERMÉ / ● DÉBOUCHAGE PARTIEL

46

CAVAL BULGARE

N^{os} TROUS

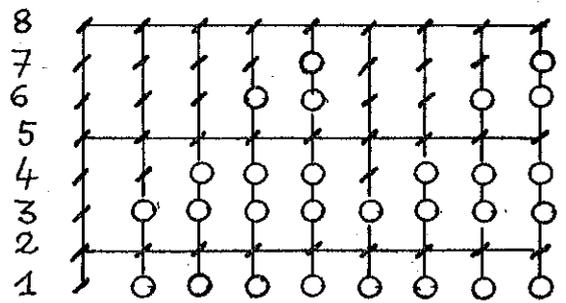


MI FA SOL LA SI DO RE MI

PARTIEL 2 PARTIEL 3

PARTIEL 2 PARTIEL 3

N^{os} TROUS

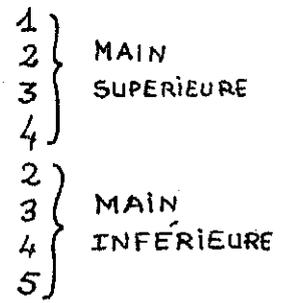


RE FA# SOL LA SI DO# RE MI FA

PARTIEL 2 PARTIEL 3

PARTIEL 2 PARTIEL 3

N^{os} Doigts



← En appelant DO le fondamental de l'instrument

← NOTES REELLES

a

b

47

- Le caval bulgare est un exemple presque théorique de la flûte à demi-tons successifs, (mis à part le premier trou dont l'intervalle avec le fondamental est toujours au moins d'un ton sur les instruments que nous connaissons) : de taille fine, les huit trous sont sur la moitié inférieure de l'instrument et donnent à peu de choses près la suite des sons chromatiques de RE à LA.

D'après les disques de musique bulgare que nous avons pu écouter, les modes fréquemment utilisés, mode de MI, de SOL, de LA, de Sol mineur avec quarte augmentée et... se trouvent aisément en laissant, pour l'un ou pour l'autre certains doigts en place. En cherchant à reproduire ces modes sur l'instrument nous avons fait la remarque suivante :

fig.47a

Partant d'un partiel 2 quelconque, par exemple le 1er trou ouvert, puis débouchant les trous suivants d'un mode donné, on s'arrête juste avant la quinte; pour continuer le mode on recommence les doigtés des premiers sons, mais en excitant le partiel 3 (qui est à la quinte du partiel 2). Ex. fig. 47a.

Comme les deux tétracordes sont souvent identiques, le doigté est de ce fait très simple : pour jouer une échelle sur une octave, on ne bouge que trois doigts ! Les doigts qui restent en place sur les trous permettent de bien tenir l'instrument et sont de bons repères mnémoniques pour le mode que l'on joue.

fig.47b

Nous donnons, fig. 47b les doigtés d'un autre exemple de succession mélodique souvent entendue en musique bulgare; trois doigts restent en place quel que soit le partiel joué.

Finalement un instrument construit selon ce système de trous permet de combiner tons et demi-tons de façon quelconque; on en voit bien l'intérêt.

Il convient ici de faire deux remarques.

Lorsque nous écrivons des noms de notes en correspondance avec les trous des instruments, ou sous un schéma de doigtés, nous ne perdons pas de vue l'existence du champ de liberté en fréquence, particulièrement important dans le cas du caval, puisque cet instrument a une embouchure de ney. Nous savons bien qu'il est nécessaire de tenir compte de ce champ de liberté si on ne veut pas dire d'erreurs sur les échelles des flûtes. Cependant, quelle que soit l'habileté d'un musicien à modifier l'embouchure, ou à découvrir plus ou moins les trous, il demande à l'instrument de lui fournir une échelle base qui s'approche d'un modèle théorique donné. A partir de cette base, le musicien pourra hausser ou abaisser les sons à volonté en agissant sur le champ de liberté et même ne jamais jouer les sons " théoriques " de l'instrument tout comme le violoniste qui accorde avec rigueur les cordes de son instrument par 5tes justes, mais qui n'emploie pas nécessairement les sons donnés par les cordes à vide.

Il est bien sûr possible de jouer n'importe quelle mélodie sur n'importe quel tuyau sans embouchure, percé de 3 ou 4 trous, quelconques. Mais en examinant les divers types de flûtes on constate que certains systèmes de trous permettent de jouer plus facilement et plus sûrement certaines échelles musicales. C'est pourquoi il nous a semblé intéressant d'examiner le problème de la perce des trous en étroit rapport avec l'utilisation musicale de l'instrument. Dans la 4ème partie nous proposerons une classification des flûtes de ce point de vue.

Toujours à propos des échelles fournies par les instruments il faut bien distinguer les instruments de musique populaire de ceux qui sont employés en musique savante. Nous faisons là non une différence de qualité, mais de finalité. Un instrument de musique populaire peut être rattaché à un type donné, par exemple la flûte à 6 trous. Mais les proportions des différentes parties de l'instrument n'étant pas fixées de façon rigide, on pourra trouver bien des variantes dans les échelles de plusieurs flûtes à six trous, même provenant d'une même région. Peu importe. Le musicien joue souvent

...../

seul; il est habitué à son instrument, corrige comme il peut s'il est habile. Sinon, il joue la mélodie " à peu près " : on la reconnaîtra bien assez....

Par contre en musique savante, les musiciens raffinent sur les questions de justesse; en musique d'ensemble, plusieurs instruments doivent s'accomoder les uns aux autres; enfin, un musicien est souvent appelé à jouer des instruments de dimensions différentes. Tous ces facteurs contribuent à une certaine normalisation des instruments.

Lorsque les flûtes utilisent des tuyaux naturels, comme le roseau, il faut adapter la perce des trous aux irrégularités internes du tuyau. Les neys sont particulièrement intéressants de ce point de vue. Si l'instrument est tourné, toutes sortes de perces sont possibles.

En Occident où les développements de l'harmonie ont conduit les musiciens à utiliser des sons de hauteur définie sans pour autant abandonner la virtuosité, on assiste, dans l'histoire de la facture des instruments à vent à toutes sortes d'essais, pour que, finalement, à un doigté donné corresponde un son " juste ", c'est-à-dire ne nécessitant pas, ou peu de corrections. C'est d'abord la flûte à bec qui a bénéficié des recherches des facteurs. La flûte traversière ayant un champ de liberté en fréquence plus grand, est longtemps restée " imparfaite " puisque le musicien a plus de facilité pour corriger. Tout cela étant précisé nous allons aborder maintenant les problèmes liés à la perce du tuyau.

Chap. IV - PARTICULARITES DE LA PERCE LONGITUDINALE

DES TUYAUX CYLINDRIQUES

§ 3.33 - Généralités

Les tuyaux naturels, tige creuse, bambou, roseau, que nos ancêtres avaient à leur disposition pour faire les premières flûtes sont loin d'être parfaitement cylindriques. Du fait de la croissance, le diamètre à la base est généralement plus fort qu'à l'extrémité; dans le roseau et le bambou, des cloisons transversales coupent systématiquement la tige; mêmes évidées, ces cloisons laissent des discontinuités car l'épaisseur de la tige est plus considérable à leur endroit.

En examinant des instruments comme la kena d'Amérique du sud, le ney tunisien, on constate que ces irrégularités de section ont été exploitées sciemment pour des fins musicales précises.

Les instruments de bois tourné sont aussi rarement cylindriques... Pour des raisons multiples (anatomiques, musicales) les facteurs ont réalisé des types de perces très variés : cône simple, association de deux cônes différents, cylindre muni de rétrécissement près de l'embouchure, près de l'extrémité... Les expériences que nous avons faites nous ont permis de comprendre les raisons de certaines pratiques des facteurs.

Le cas des tuyaux à cheminée se rattache aussi à ce chapitre. BOUASSE a consacré de nombreux paragraphes aux tuyaux à cheminée. Nous avons repris certaines de ses expériences, d'autant que les moyens spectrographiques dont nous disposons aujourd'hui apportent d'importantes informations sur le problème du timbre.

Nous étudierons tout d'abord les modifications locales de la perce des tuyaux cylindriques, puis les tuyaux coniques, et enfin les instruments réels, de perce généralement " composite ".

1) RETRECISSEMENT LOCALISE : DEPLACEMENT D'UN DIAPHRAGME MINCE PERCE D'UN TROU

Nous avons fait trois séries d'expériences. D'abord avec un tuyau ouvert aux deux bouts, puis avec un tuyau muni d'une embouchure de flûte, c'est-à-dire partiellement fermé à un bout, enfin avec un tuyau à bouche percé de trous.

§ 3.34 - Tuyau ouvert aux deux bouts

Le tuyau utilisé a les dimensions suivantes : longueur $L = 350$ mm, diamètre intérieur $D = 20$ mm, épaisseur $\varepsilon = 2$ mm. Un diaphragme rigide et suffisamment mince ($\varepsilon = 2$ mm), percé d'un trou concentrique de diamètre 9,6 mm coulisse à frottement doux à l'intérieur du tuyau. Dans un premier temps on excite le tuyau à l'aide d'un jet dirigé dans le plan de l'extrémité ouverte, et on relève le champ de liberté en fréquence

des partiels existant pour chaque position du diaphragme. Les résultats obtenus montrent bien l'allure des phénomènes, mais sont assez imprécis. En effet, un partiel donné ne sort bien que pour une certaine distance de l'ajutage au bord du tuyau; mais si l'on modifie cette distance; on change aussi la fréquence des partiels... De plus, lorsque la distance du diaphragme au jet est inférieure au $1/4$ de la longueur totale, on ne peut plus produire le fondamental.

fig.48

Nous avons donc repris l'expérience en utilisant le dispositif d'excitation par haut-parleur. Les résultats en sont présentés fig.48 pour les 4 premiers partiels. La sonde employée pour mesurer les fréquences à l'intérieur du tuyau, dans la partie comprise entre l'extrémité excitée par le haut-parleur et le diaphragme, étant trop courte, nous avons complété les courbes par symétrie par rapport au milieu du tuyau (partie pointillée des courbes). Pour chaque partiel la droite horizontale en traits interrompus représente la fréquence de résonance relevée sans diaphragme. Dans le bas de la figure on a superposé les courbes des partiels ce qui permet d'apprécier leur justesse relative.

On vérifie que :

- le diaphragme placé à un noeud de vitesse ne change pas la fréquence.

$1/2$ du tuyau pour P_1

$1/3$ et $2/3$ pour P_2 etc...

- pour d'autres positions du diaphragme, les fréquences des partiels sont toujours abaissées. L'abaissement étant maximum lorsque le diaphragme se trouve à un ventre de vitesse.

- la période spatiale des phénomènes est de $\lambda/2$

- Aux extrémités, les partiels sont abaissés simultanément; leurs rapports sont peu modifiés. On est d'ailleurs ramené au cas des tuyaux partiellement fermés à une extrémité (cf § 3.02). Les résultats concordent bien avec la théorie. Voyons maintenant ce qu'il en est pour un tuyau à bouche.

§ 3.35 - Tuyau ouvert à un bout, partiellement fermé à l'autre (tuyau à bouche)

Plaçons à une extrémité du tuyau une embouchure de flûte à bec, de telle sorte que la longueur comptée du centre de la fenêtre à l'extrémité ouverte soit de 350 mm comme précédemment. Du fait de la fermeture partielle à l'embouchure, les fréquences sont nécessairement plus basses, et l'inharmonicité des partiels est déjà notable sans diaphragme. Pour exciter le tuyau et relever le champ de liberté des fréquences nous utilisons de l'azote comprimé.

fig.49

La fig. 49 montre les résultats.

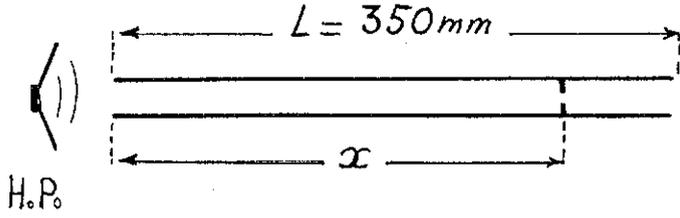
Les variations de fréquence des partiels en fonction de la place du diaphragme se font bien dans le même sens que précédemment, mais la figure appelle deux remarques :

- les courbes n'ont pas la belle régularité des relevés de résonance; elles sont décalées vers la gauche (du côté de l'embouchure), la correction de longueur étant plus notable de ce côté.

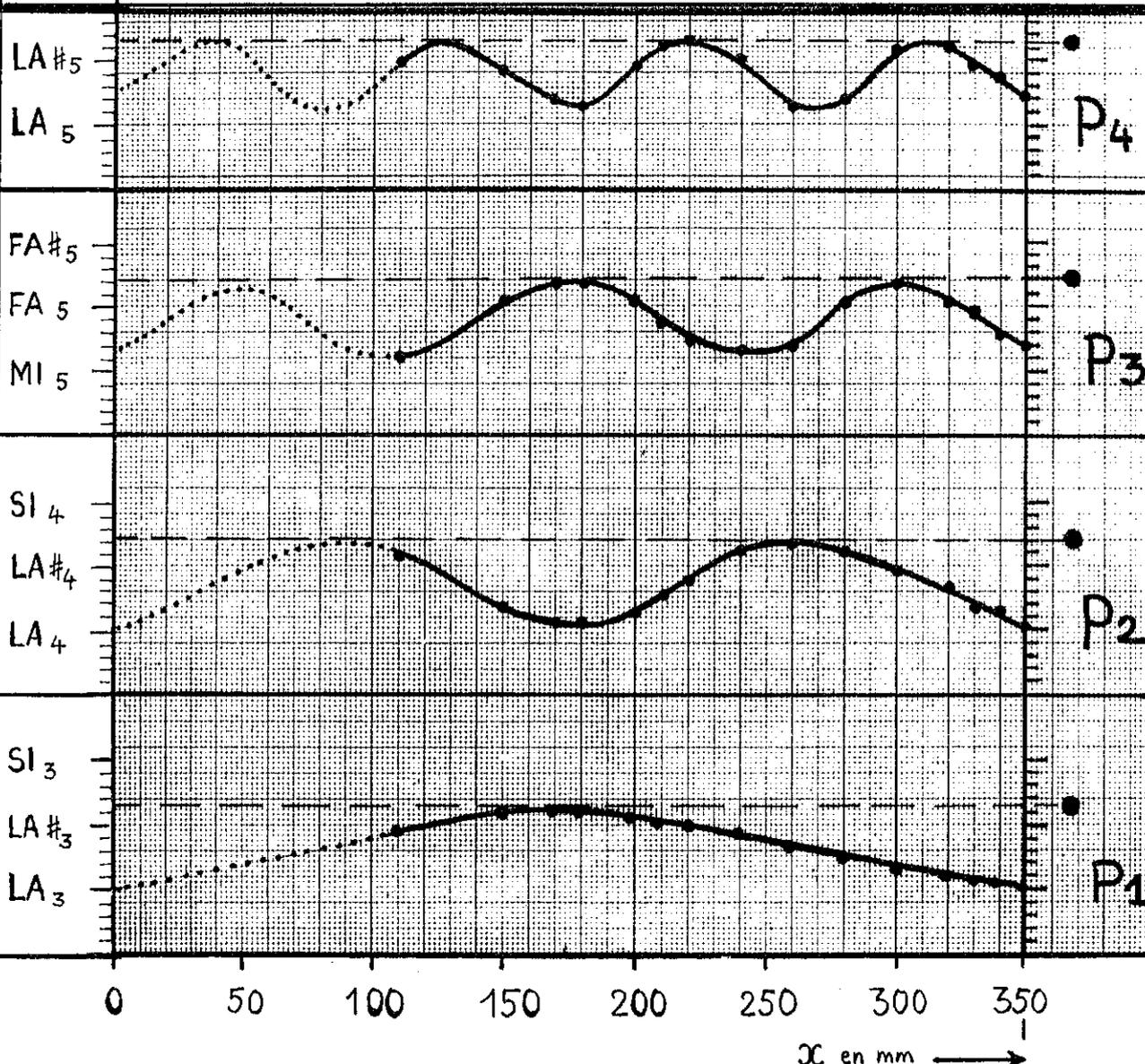
- Lorsque le diaphragme se trouve au voisinage du ventre de vitesse d'un partiel donné, l'amplitude de celui-ci diminue; le partiel devient instable, difficile à émettre, et même, disparaît. S'il est de rang élevé, le nombre de ventres augmentant, les zones d'existence se réduisent d'autant. Ce que l'on voit bien pour le partiel 4.

...../

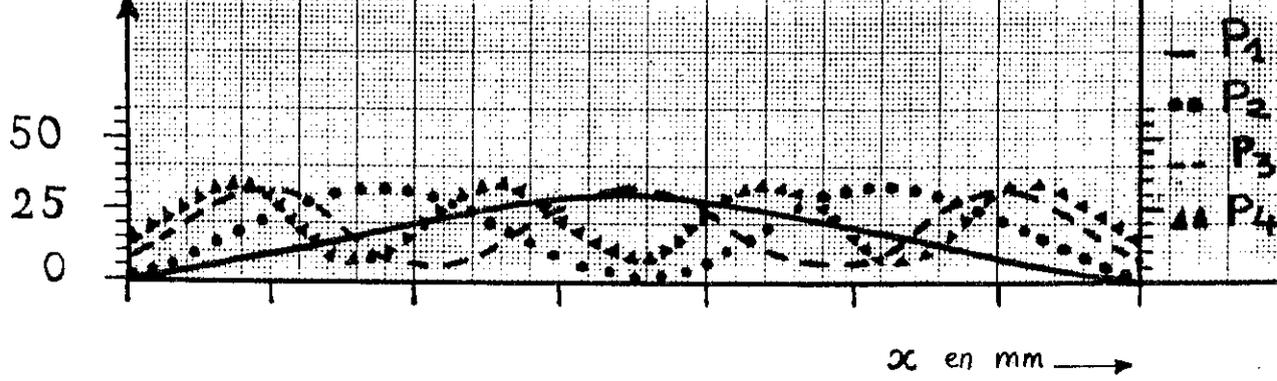
(48)



FRÉQUENCE

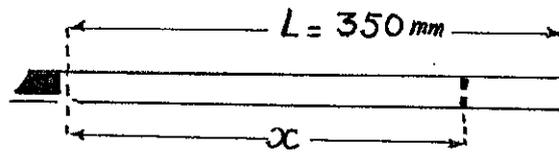


Ecart en savarts

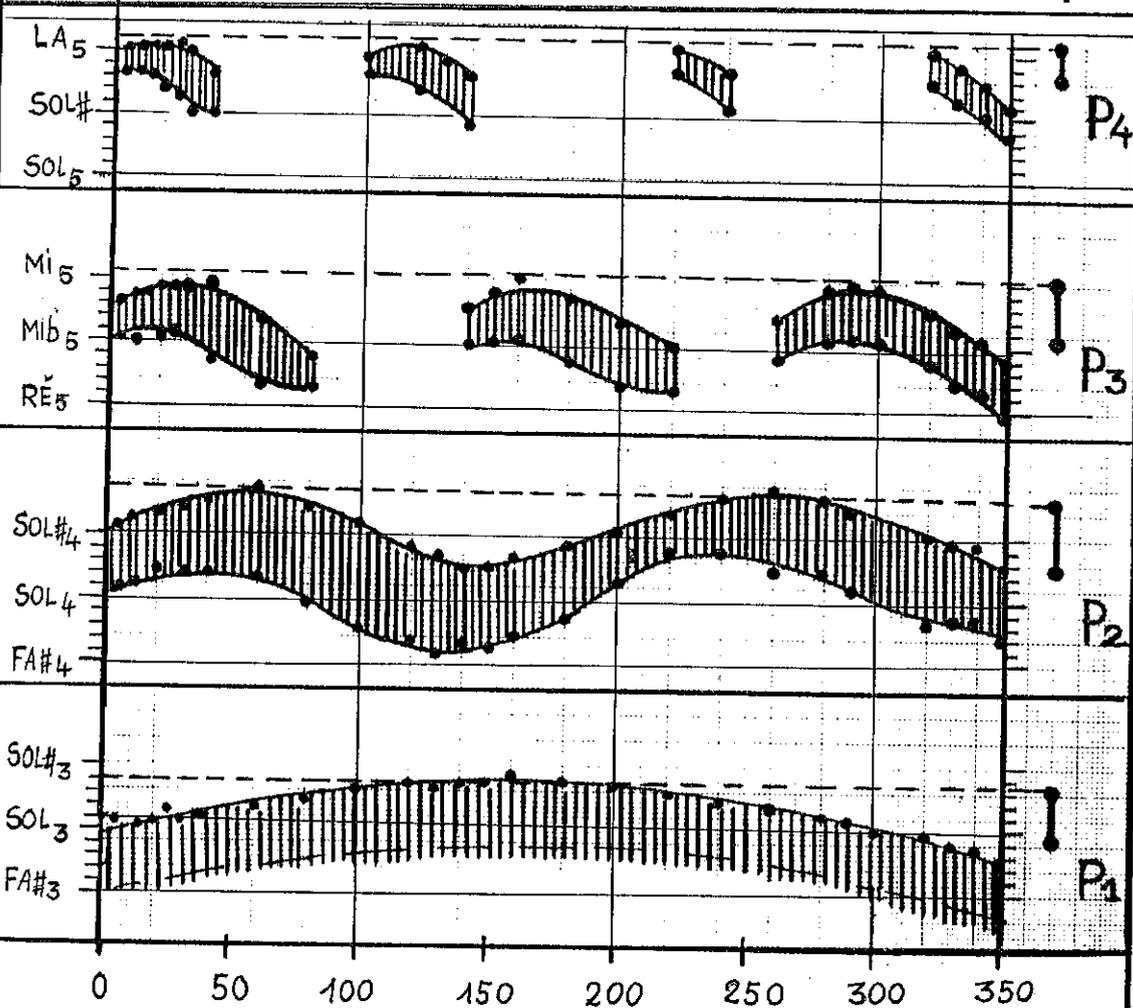


49

fréquence

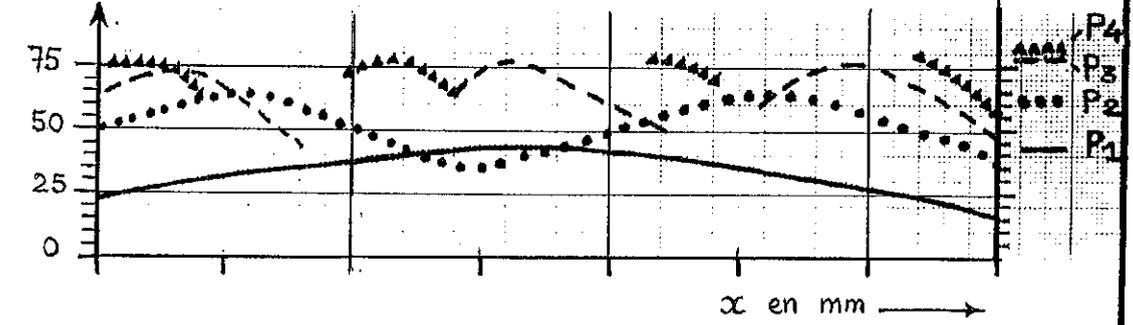


sans diaphragme
↓



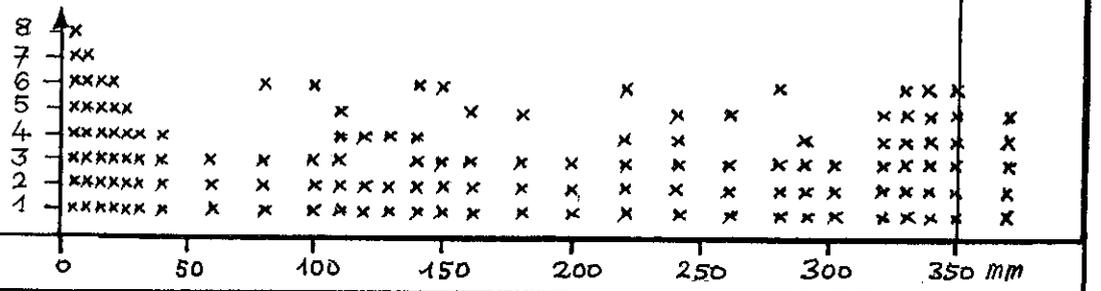
a

écarts en savarts



b

N^{os} des Partiels



c

Lors de l'étude du déplacement d'un trou latéral le long d'un tuyau (§ 3.15) nous avons constaté des phénomènes semblables.

Pour préciser quels partiels sortent effectivement selon la position du diaphragme nous avons repris ce tuyau en le jouant comme une flûte à bec et en attaquant les sons avec un coup de langue, (car certains partiels ne sortent qu'au coup de langue : il est impossible de les accrocher en modifiant la pression de façon progressive). Portons sur une figure les numéros des partiels que l'on peut produire pour chaque position du diaphragme.

fig.49c

Le graphique de la figure 49c est assez significatif : un rétrécissement du diamètre du tuyau au voisinage des extrémités favorise l'émission des partiels de rang élevé. C'est tout près de la bouche que le phénomène est le plus marqué : les 8 premiers partiels sortent aisément.

Ces résultats difficilement prévisibles dans l'état actuel de la théorie confirment une fois de plus la pratique des facteurs d'instruments. En effet, nombre de flûtes de bambou, de roseau, ou même de bois tourné possèdent un rétrécissement du diamètre à la partie inférieure (noeud incomplètement percé par ex.). Cette pratique a donc un double but :

- d'une part, produire avec un tuyau de longueur donnée un fondamental relativement grave, sans trop perturber la justesse des partiels,

- d'autre part, favoriser l'émission des partiels aigus, donc augmenter l'étendue de l'instrument.

Le Ney tunisien offre un exemple de rétrécissement placé près de l'embouchure. Pour construire l'instrument on coupe le roseau de façon qu'un noeud se trouve très près de l'embouchure, environ au 1/16 de la longueur totale. La cloison du noeud est percée d'un trou dont le diamètre est environ la moitié de celui du tuyau. On obtient ainsi un rétrécissement " naturel " qui favorise l'émission des partiels aigus (voir 4ème partie fiche n° 14).

En résumé, un rétrécissement local du diamètre d'un tuyau cylindrique abaisse toujours la fréquence des partiels. Près des extrémités, les rapports de justesse des partiels sont peu perturbés et les partiels de rang élevé sortent mieux.

Nous n'avons pas fait d'expérience systématique concernant l'importance du rétrécissement, c'est à dire le rapport du diamètre du trou du diaphragme, au diamètre du tuyau. On peut dire toutefois, que plus ce rapport est petit, plus les phénomènes sont accentués (abaissement, inharmonicité des partiels) mais si le trou devient trop petit, le tuyau parle mal, en particulier le fondamental sort difficilement.

Les valeurs mesurées sur des instruments divers se situent entre le 1/3 et le 1/2 du diamètre.

Les flûtes étant des tuyaux ordinairement percés de trous, il nous reste à examiner ce qui se passe lorsqu'on place un diaphragme en amont ou en aval d'un trou.

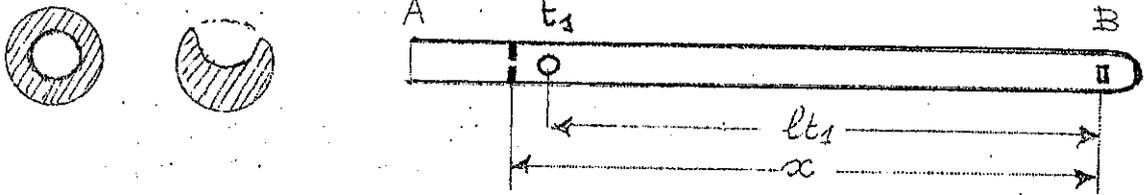
§ 3.36 - Tuyau à bouche percé d'un trou

Prenons d'abord le cas d'un tuyau percé d'un trou. Sur la paroi du tuyau à bouche utilisé précédemment, perçons un trou latéral t_1 de diamètre 5,5 mm et situé à 303 mm du centre de la bouche. Afin d'évaluer avec plus de précision l'intervalle obtenu en débouchant le trou nous relevons, en plus du champ de liberté, la fréquence des partiels pour certaines valeurs fixes de la pression (5 mm d'eau pour le partiel 1 et

...../

12 mm d'eau pour le partiel 2).

Enfin pour éviter que le diaphragme n'obstrue partiellement le trou latéral quand il se trouve à son niveau, nous avons employé un diaphragme "équivalent" n'ayant pas de trou central mais portant une échancrure latérale, et donnant des résultats identiques à certains emplacements connus.



Les variations de la fréquence des partiels 1 et 2 en fonction de la place du diaphragme sont représentées fig.50 pour le trou t_1 ouvert.

- Tant que $x > lt_1$ la fréquence est relativement peu abaissée bien que le perturbation soit notable : 8 à 10 savarts pour les conditions expérimentales données.

- Dès que le diaphragme atteint, puis franchit le trou : $x = lt_1$ l'abaissement croît très vite pour un petit déplacement du diaphragme; il atteint 20 savarts pour P_1 , et 16 savarts pour P_2 .

- $x < lt_1$, l'allure des courbes nous ramène au cas précédent (tuyau sans trou).

fig.51a

Il est intéressant de voir, fig. 51a ce que devient l'intervalle musical formé par le son du tuyau trou bouché N_0 puis trou ouvert N_1 . I est l'intervalle N_1/N_0 sans diaphragme.

PARTIEL 1 : $I = 22$ savarts

$x > lt_1$; N_0 est beaucoup plus abaissé que N_1 . L'intervalle atteint 37 savarts (il a presque doublé), et se maintient à cette valeur.

$x = lt_1 \pm \epsilon$ l'intervalle diminue rapidement, et devient inférieur à I.

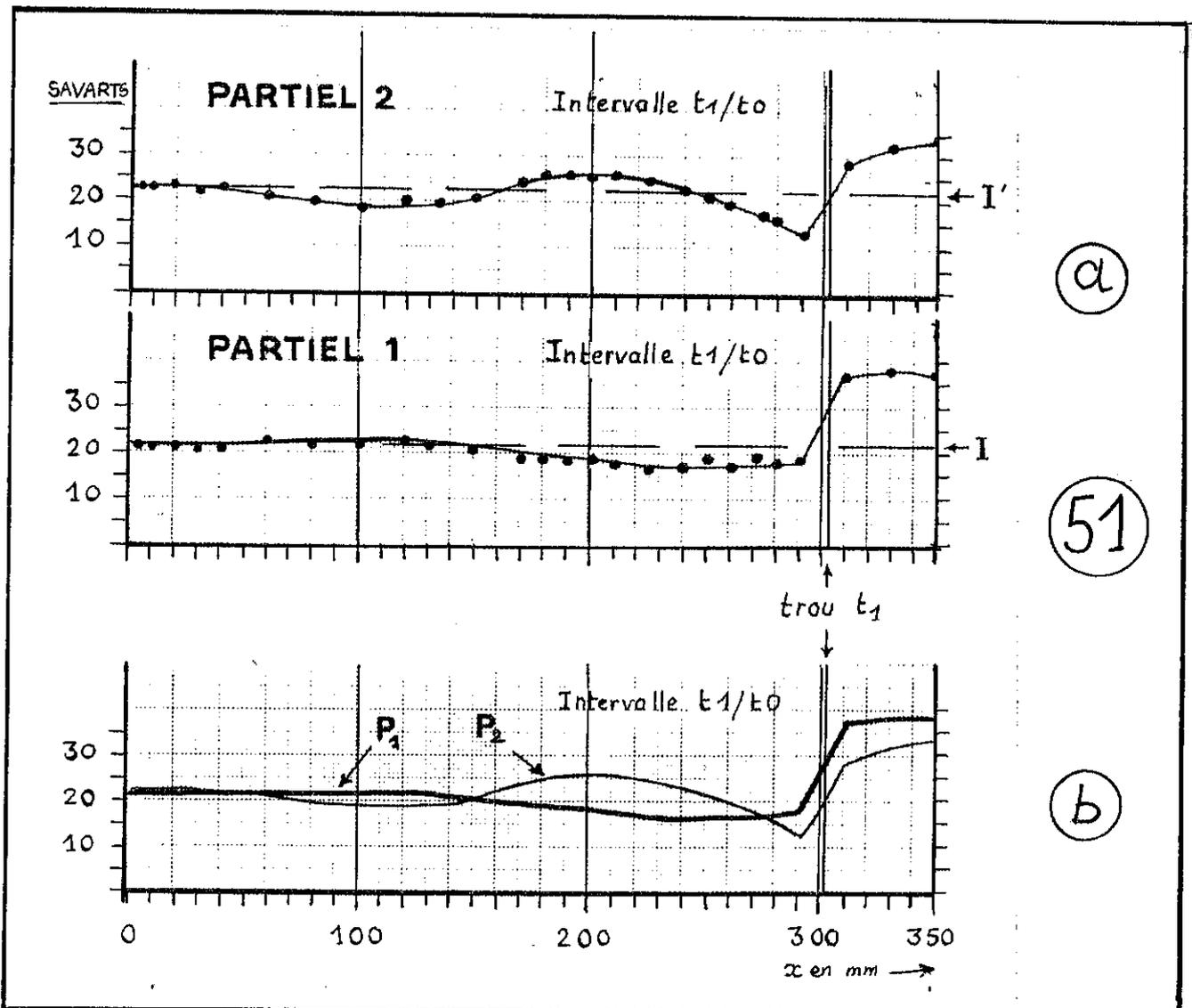
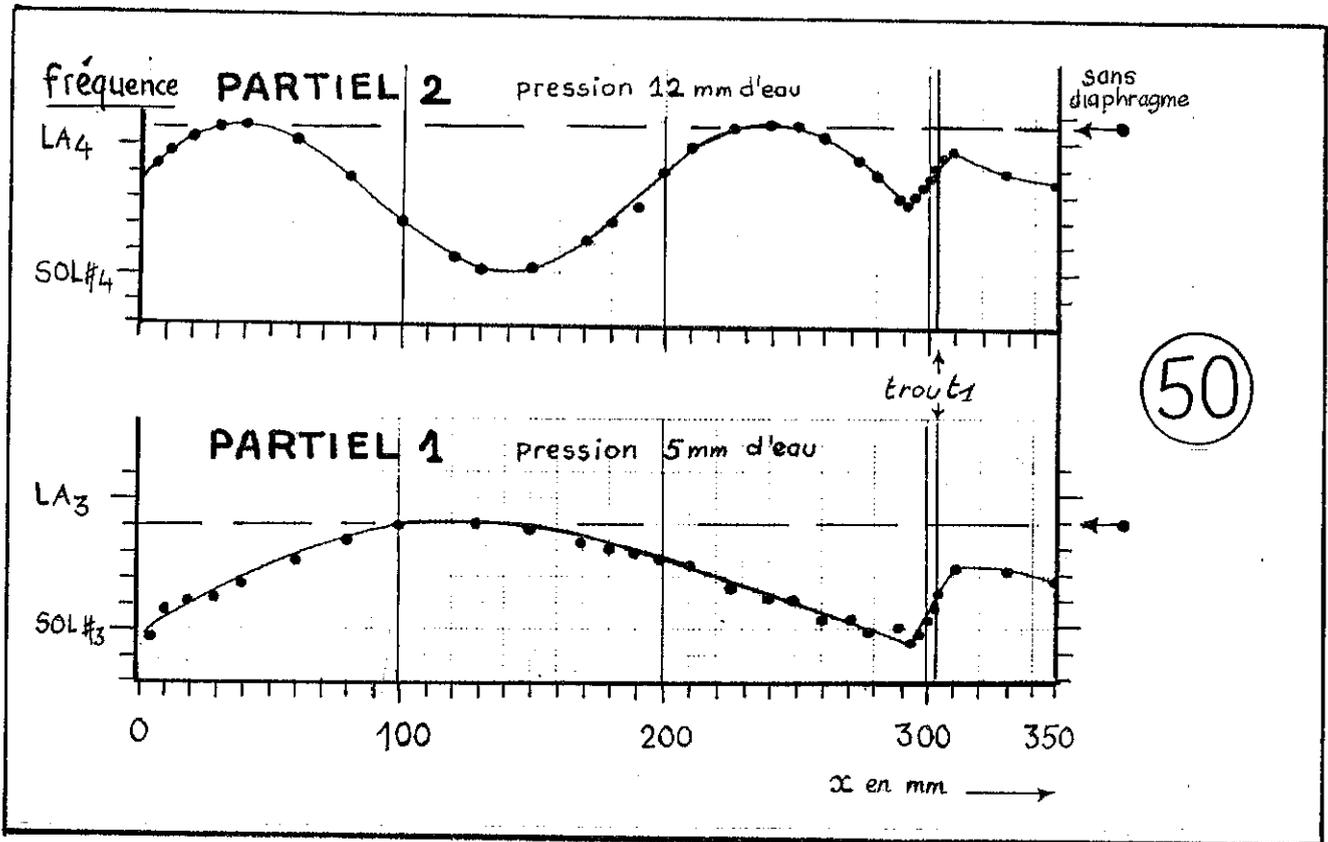
$x < lt_1$; N_1 est plus abaissé que N_0 . L'intervalle continue à décroître, atteint un minimum (16 savarts) puis se rapproche de I de façon asymptotique, pour s'y maintenir lorsque le diaphragme est dans le dernier tiers du tuyau, ce qui signifie alors que les deux fréquences N_0 et N_1 évoluent parallèlement.

PARTIEL 2 : $I' = 22$ savarts

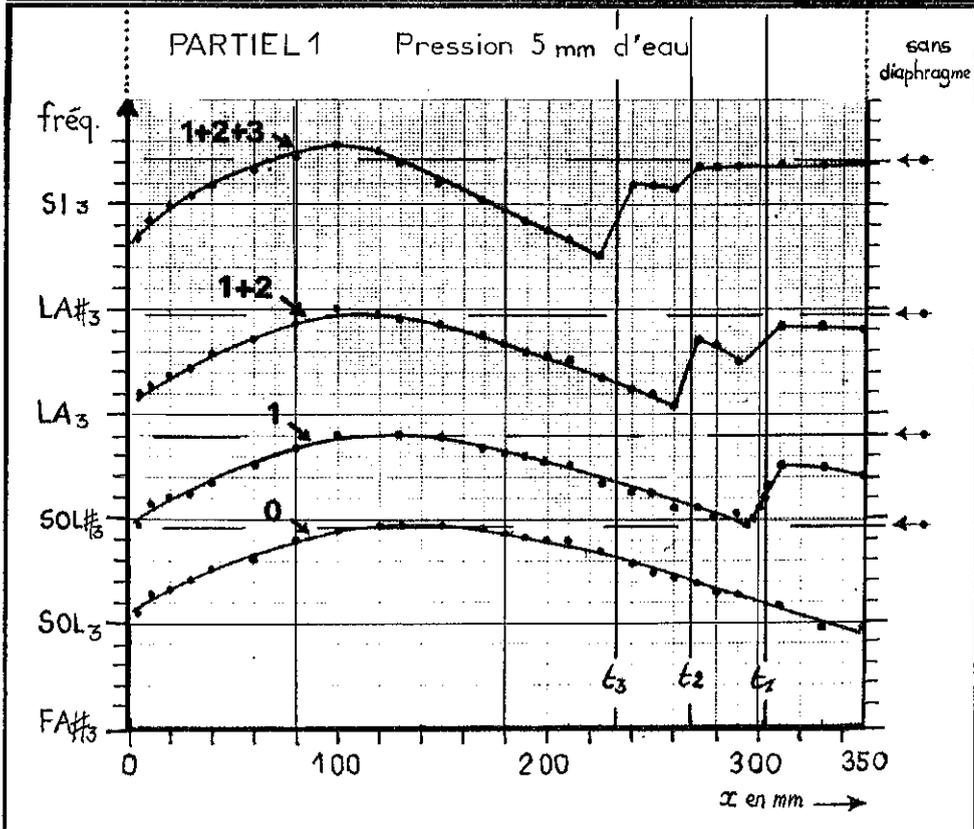
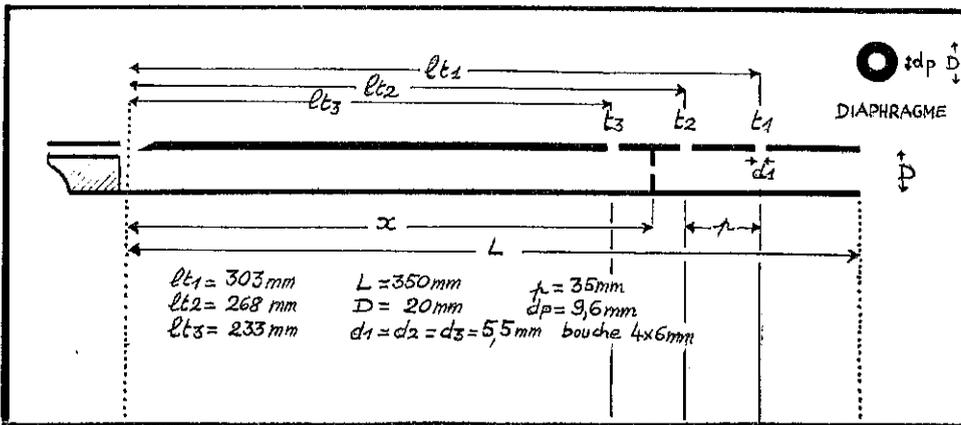
Les phénomènes sont comparables : intervalle maximum lorsque le diaphragme est au delà du trou, et minimum lorsqu'il est en deçà, c'est-à-dire entre le trou et l'embouchure. La courbe coupe deux fois l'horizontale I' avant de s'en rapprocher asymptotiquement.

fig.51b Superposons les courbes d'intervalles des partiels 1 et 2 pour apprécier leur inharmonicité en fonction de la position du diaphragme (fig.51b); on note seulement deux points de coïncidence : $x = 265$ et $x = 150$ et à proximité de la bouche $x < 40$. Pour toutes les autres positions du diaphragme les intervalles sont modifiés différemment pour les partiels 1 et pour les partiels 2.

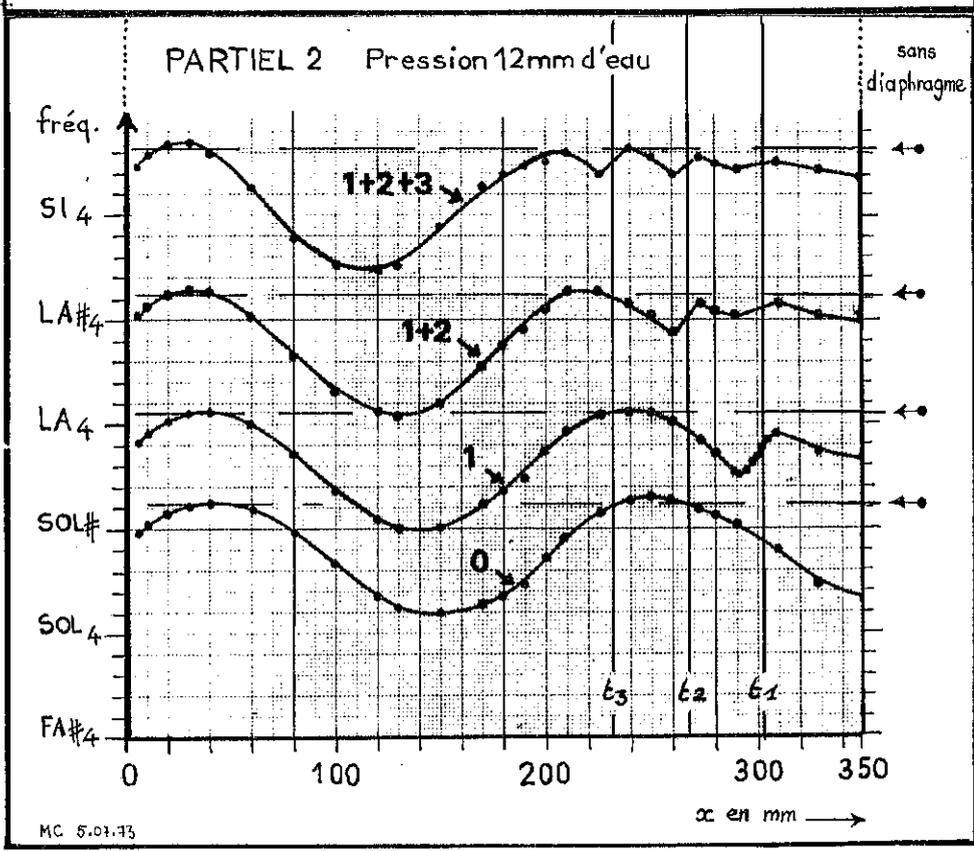
Retenons que, pour le cas considéré, un diaphragme placé au delà du trou agrandit l'intervalle obtenu en débouchant le trou, et au contraire, le diminue lorsqu'



52



a



b

il est placé juste avant le trou. Pour d'autres positions du diaphragme les phénomènes varient avec le partiel considéré.

Il faudrait maintenant faire une série d'expériences pour connaître les rôles respectifs du diamètre et de la place du trou.

Vraisemblablement les phénomènes (abaissement, modification des intervalles) seront d'autant plus marqués que le trou est plus petit.

En ce qui concerne la place du trou nous savons que celui-ci crée un ventre de vitesse à son voisinage. Or l'action d'un rétrécissement est maximum à cet endroit; On peut donc avancer que la place du trou ne change pas grand chose.

§ 3.37 - Tuyau à bouche percé de trois trous identiques, équidistants.

Notre intention, en faisant cette expérience, était de nous placer dans les conditions normales d'une flûte à bec à trois trous, et d'étudier les variations de l'échelle musicale de l'instrument en fonction de la place d'un rétrécissement. Les trous ont même diamètre ($d = 5,5$ mm) et sont distants de 35 mm. On a donc relevé la fréquence des partiels pour certaines pressions stables et pour les états successifs du tuyau :

0	Tous les trous bouchés	}	I_1 ,	intervalle t_1/t_0
1	1er trou ouvert		I_2 ,	" t_1+t_2/t_1
1+2	1er et 2ème trous ouverts		I_3 ,	" $t_1+t_2+t_3/t_1+t_2$
1+2+3	les trois trous ouverts			

fig.52a
et b
fig.53a
et b

Les fig.52a et b donnent les résultats pour la variation en fréquence des partiels 1 et 2, les fig. 53a et b pour les modifications des intervalles. De telles figures montrent bien la complication des phénomènes; elles appellent quelques remarques.

- Fig.52 on voit clairement que toutes les courbes sont situées respectivement en dessous des fréquences relevées sans diaphragme : un rétrécissement abaisse toujours la fréquence. Lorsque le diaphragme passe en amont d'un trou, les fréquences des partiels correspondant à ce trou sont abaissées d'une plus grande quantité, mais également celles des partiels du trou voisin placé plus haut. A 2 trous de distance l'effet est plus faible, mais encore décalable. Comme le sens des variations n'est pas toujours le même pour les différents partiels on comprend les complications qui en résultent.

Les intervalles entre les sons obtenus en débouchant les trous successivement sont donc tantôt agrandis, tantôt diminués (fig.53). Par conséquent on peut modifier l'échelle d'un instrument en plaçant des rétrécissements entre certains trous.

Prenons un exemple précis : dans notre expérience, disposons le diaphragme entre le 2ème et le 3ème trou, à 250 mm de la bouche. Portons sur un tableau les fréquences successives obtenues en débouchant les trous, partiel 1 et 2, les intervalles musicaux correspondant ainsi que les intervalles entre le fondamental et chaque série de trous (tableau de la fig.54).

fig 54

Tous les sons de notre instrument sont abaissés par le diaphragme. Dans ce cas particulier, l'intervalle 1+2+3/0 entre le fondamental et le son de l'instrument tous les trous ouverts, n'est pratiquement pas modifié. Il n'en est pas de même des

53

a

b

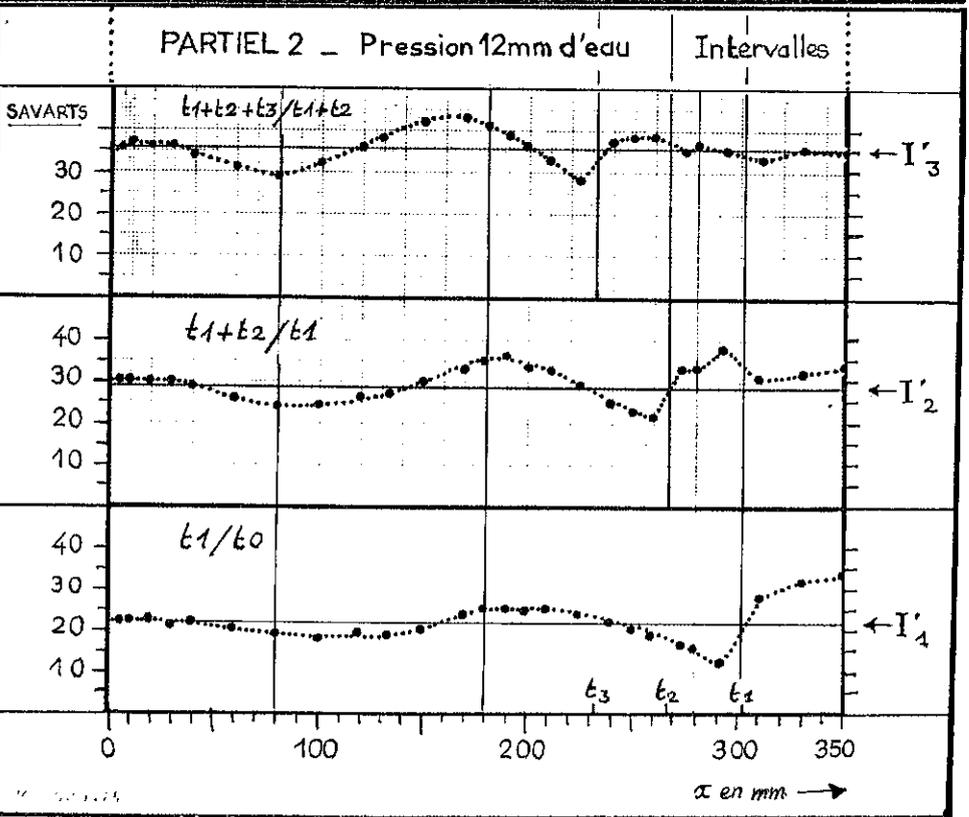
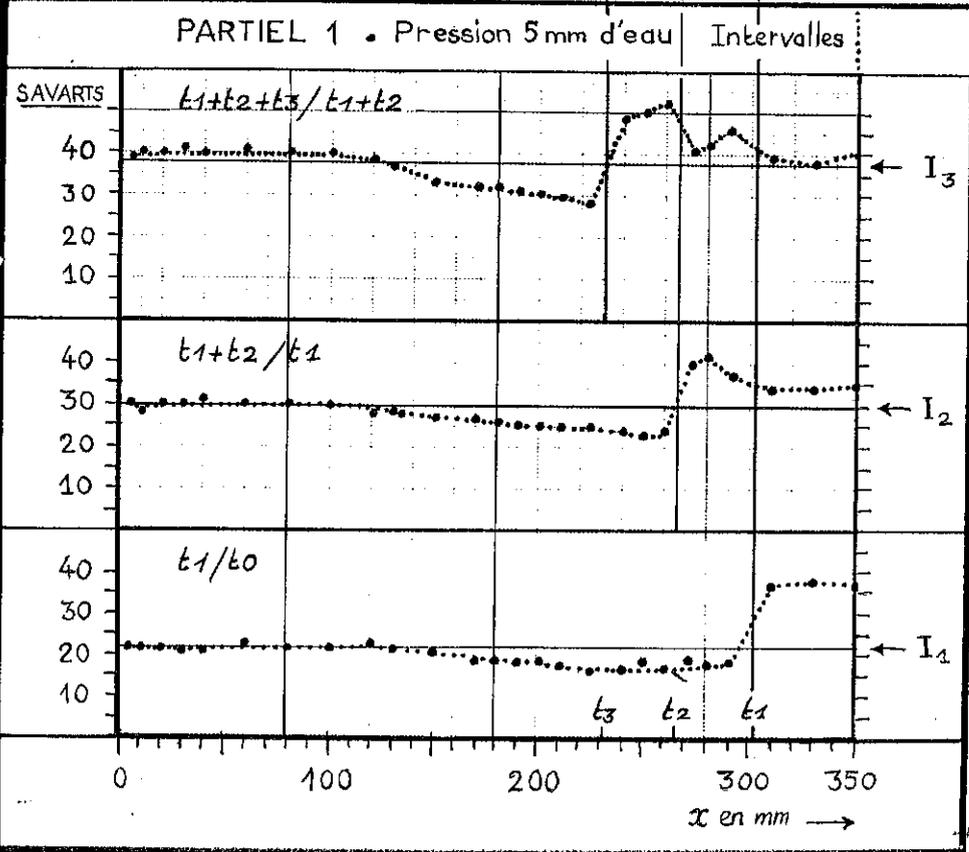
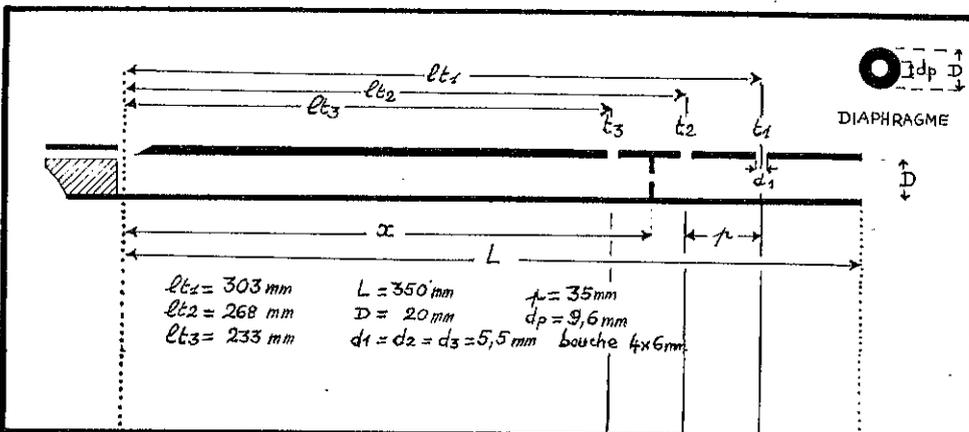


fig 55 : autres. Les modifications apparaissent clairement sur le graphique de la figure 55.

Nous ne poursuivrons pas plus avant les commentaires car une restriction s'impose : les fréquences des partiels 1 et 2 ont été relevées chacune pour une pression constante. Cette méthode est commode pour déceler des différences fines de fréquences avant et après une modification du tuyau, mais elle ne correspond pas tout à fait à la réalité du jeu dans le cas de plusieurs trous. En effet, la pression nécessaire pour exciter un tuyau de façon optimale croît au fur et à mesure que l'on débouche les trous. Cependant, l'accroissement de la fréquence avec la pression étant pratiquement linéaire dans la zone utilisée en musique, les résultats que nous donnons restent valables pour les intervalles entre les trous successifs.

§ 3.38 - Conclusions et applications en facture instrumentale. (Le ney en roseau)

En résumé :

- Un rétrécissement localisé du diamètre abaisse toujours les fréquences des partiels.

- L'abaissement dû au rétrécissement est maximal lorsque celui-ci se trouve à un ventre de vitesse.

- Les partiels correspondant à différents modes vibratoires du tuyau sont abaissés différemment; leurs rapports sont donc modifiés par un rétrécissement, sauf aux extrémités où les partiels ont en commun un ventre de vitesse.

- A partir des partiels 3, 4 et plus, un abaissement trop important de la fréquence rend ceux-ci difficiles à émettre. Selon la place du rétrécissement certains partiels ne sortent plus.

- Les extrémités du tuyau sont deux emplacements privilégiés pour disposer un rétrécissement. D'une part les rapports des partiels sont peu modifiés, d'autre part, ces partiels sont d'émission plus facile. Près de l'embouchure, un rétrécissement du diamètre favorise l'émission des partiels de rang élevé, qui sortent en plus grand nombre, au détriment il est vrai des partiels inférieurs qui deviennent moins intenses.

- Placé entre les trous et l'extrémité ouverte le rétrécissement est moins efficace mais on observe tout de même un abaissement très net du son. La partie du tuyau située au delà des trous mérite mal le nom de "bout-mort" qui lui est donnée...

- Placé en amont d'un trou, le rétrécissement abaisse plus les fréquences correspondant à ce trou que celles des trous inférieurs. L'intervalle musical que l'on obtenait en débouchant ce trou est donc diminué.

- Avec plusieurs trous les phénomènes deviennent très compliqués, car un rétrécissement placé près d'un trou affecte aussi les trous voisins. On modifie donc plusieurs intervalles.

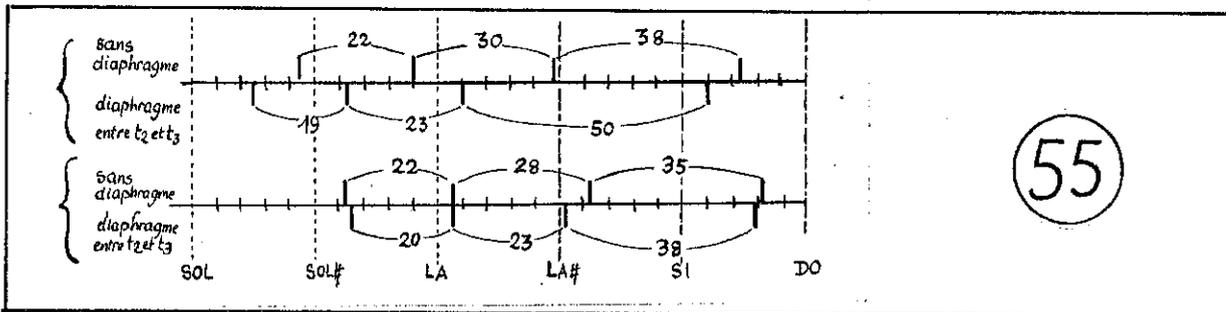
- Enfin le sens des modifications observées (intervalles agrandis ou diminués) change selon les partiels considérés.

On comprend pourquoi il est difficile de faire une flûte "juste", c'est-à-dire donnant une échelle donnée, à partir des tuyaux naturels, roseau, bambou, qui sont variables d'un morceau à l'autre de façon aléatoire.

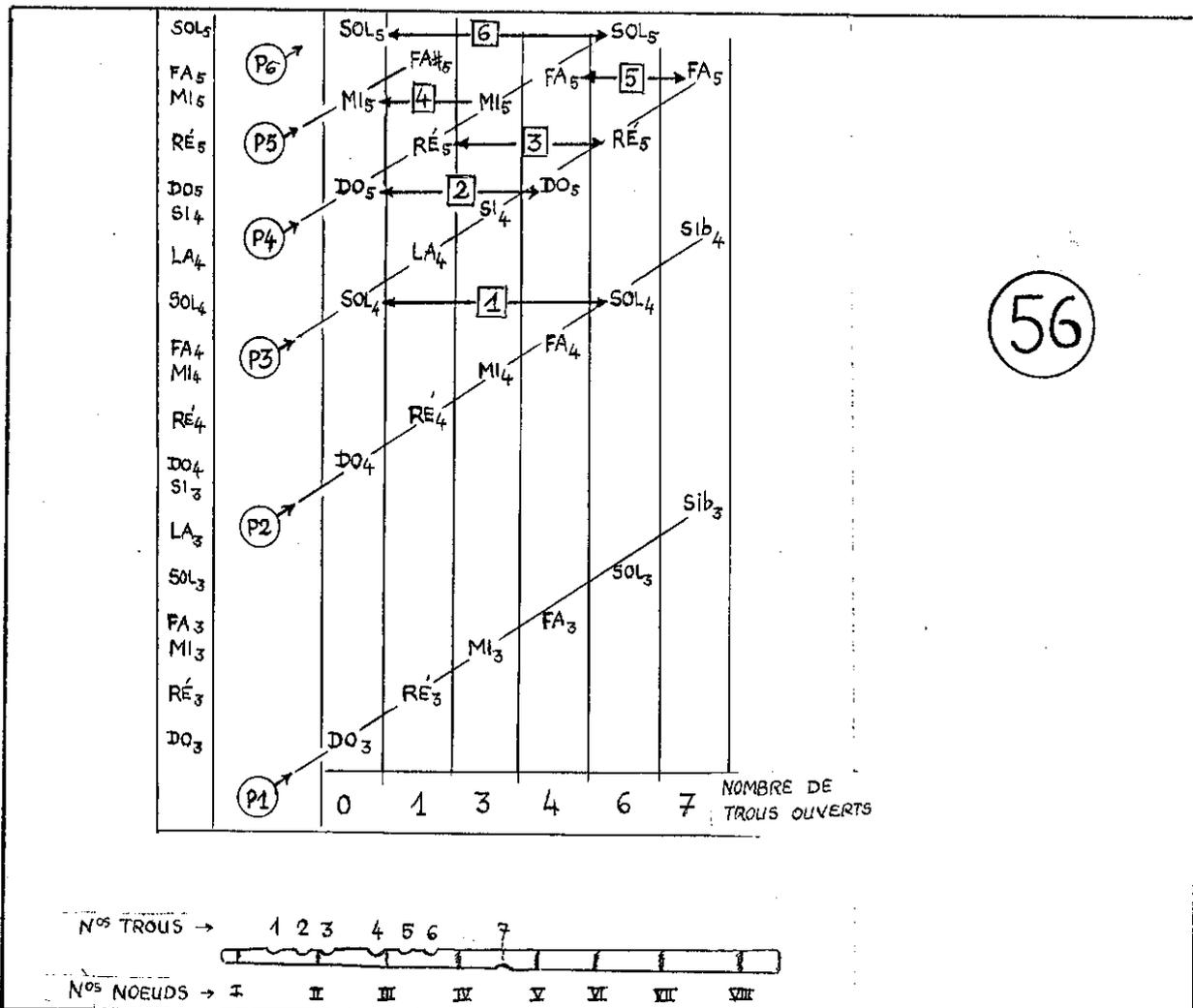
Dans le cas d'un instrument n'utilisant que le partiel 1 et quelques sons du

	PARTIEL 1			PARTIEL 2		
	1 sans diaphragme	2 diaphragme entre t ₂ et t ₃ (x=250mm)	col.1.-col.2 (sawarls)	1 sans diaphragme	2 diaphragme entre t ₂ et t ₃ (x=250mm)	col.1.-col.2 (sawarls)
Tout bouché	sol# ₃ -3	sol ₃ +13	-9	sol# ₄ +6	sol ₄ +7	+1 (?)
t ₁ ouvert	La ₃ -5	sol# ₃ +7	-13	la ₄ +3	la ₄ +3	0
t ₁ +t ₂ ouverts	la# ₃ -1	la ₃ +5	-19	la# ₄ +6	la# ₄ +1	-5
t ₁ +t ₂ +t ₃ ouverts	si ₃ +12	si ₃ +5	-7	do ₅ -9	do ₄ -11	-2
t ₁ /t ₀	22	19	-3	22	20	-2
t ₁ +t ₂ /t ₁	30	23	-7	28	23	-5
t ₁ +t ₂ +t ₃ /t ₁ +t ₂	38	50	+12	35	38	+3
t ₁ /t ₀	22	19	-3	22	20	-2
t ₁ +t ₂ /t ₀	52	42	-10	50	43	-7
t ₁ +t ₂ +t ₃ /t ₀	90	92	+2	85	81	-4

54



55



56

partiel 2, comme par exemple le pipeau de bambou, il suffit d'éviter un rétrécissement au milieu du tuyau. Lors des stages de fabrication de ces instruments (C.E.M.E.A., H. Goldenbaum) il nous était vivement recommandé de placer le noeud du bambou dans le 1/4 inférieur ou supérieur du tuyau : on comprend pourquoi... Mais si l'on désire fabriquer un instrument donnant les partiels 2, 3 et 4, les plus " justes " possibles, il faudra chercher un tuyau assez long, régulier, que l'on coupera à hauteur d'un noeud (kéna, flûte de Thaïlande, etc...). On aura ainsi un fondamental plus grave et les partiels aigus sortiront facilement. De nombreuses flûtes en bois tourné possèdent un rétrécissement terminal, preuve que ces particularités sont effectivement recherchées par les musiciens.

Une solution intéressante est celle du Ney. Cet instrument nous intéresse depuis longtemps, pour diverses raisons. Il est le type même d'un instrument de musique savante, élaboré après des siècles de recherches empiriques, à partir d'un matériau naturel : le roseau. Nous avons pu examiner des neys, essayer d'en jouer, mais surtout nous avons bénéficié de la collaboration patiente d'un musicien, F. SAIEB, avec qui nous avons fait de nombreux essais. Le roseau convenable pour faire un ney ne se trouvant pas en France F. SAIEB a essayé de fabriquer des instruments à partir de tubes cylindriques divers, mais les résultats étaient décevants; il manquait les diaphragmes créés par les noeuds du roseau. L'expérimentation sur cet instrument est particulièrement difficile en raison de l'embouchure. Si on adapte une bouche de flûte de bec on peut jouer facilement, de façon reproductible, faire des mesures, mais on n'est plus dans les conditions normales de jeu : comme pour la flûte traversière le joueur du ney adapte son jeu au registre en modifiant la couverture de l'embouchure, la distance lumière-biseau, de façon complexe, et ce faisant, il change les rapports de fréquence des partiels. Si l'on demande au musicien de faire les expériences, il joue toujours " juste ", en rectifiant de lui-même au souffle ou à l'embouchure. Il serait préférable de jouer soi-même, mais l'émission du son n'est guère facile. Pour toutes ces raisons nous ne rendrons pas compte d'expériences de justesse de l'instrument avec ou sans diaphragme.

Cela n'empêche qu'au cours des essais, nous avons pu faire des observations intéressantes. Prenons par exemple un ney Turco-Arabe que nous nous proposons de copier (cf. 4^o Partie, fiche 14 pour les mensurations). Désignons par DO_3 le son le plus grave que l'on puisse émettre, et par RE, MI, FA, SOL, et SI_b ceux que l'on obtient en débouchant successivement les trous 1, 1+3, 1+3+4, ... +6 +7. Précisons bien que ces sons n'ont pas grand'chose à voir avec la musique turque ou arabe, mais on peut fort bien jouer une telle gamme sur un ney correct.

fig 56

Supposons les partiels " justes ", et portons les sur un tableau (fig.56) de sorte que les sons de même hauteur soient sur une même ligne horizontale. On constate six coïncidences : par exemple le partiel 3 tout bouché, SOL_4 , a la même fréquence que le partiel 2 obtenu avec les six premiers trous ouverts.

Si nous essayons de reproduire ce ney en utilisant un tuyau cylindrique, nous obtenons la plupart des coïncidences correctement, mais la 5ème est impossible. D'ailleurs le partiel 4 du 4ème trou ne sort que très difficilement; il est trop haut. Mais le plus gênant est, qu'en jeu legato, il est impossible de faire certains enchaînements. Par exemple, en partant de DO_5 et en débouchant les trous, on ne peut pas rester sur le même partiel pour jouer $RE_5 MI_5 FA_5 SOL_5$, il sort $RE_5 MI_5 DO_5 RE_5$. On est redescendu au partiel 3. Enfin d'une façon générale, avec ce tuyau cylindrique les partiels aigus ne sortent pas facilement.

Façons tout d'abord un diaphragme près de l'embouchure, simulant le noeud incomplètement percé qui existe sur le ney normal. On constate immédiatement que l'aigu " sort " bien; mais que les intervalles sont faussés... En effet, si ce rétrécissement ne perturbe pratiquement pas les partiels du tuyau tout bouché, il n'en va pas de même lorsqu'on débouche les trous, la distance de ce noeud à l'embouchure devenant une proportion notable du tuyau. On constate aussi que les partiels s'enchaînent bien

...../

les uns aux autres. Finalement, avec ce rétrécissement, le ney fonctionne mieux mais il est faux.

Disposons alors les autres " noeuds "; par tâtonnements nous nous rapprochons de l'instrument normal, nous pouvons faire ainsi un ney correct de fondamental plus grave, qui peut satisfaire un musicien.

On pourra apprécier l'extrême habileté des musiciens traditionnels qui, à partir d'essais empiriques, ont réussi à mettre au point une adaptation réciproque de l'emplacement des trous et des noeuds de sorte qu'avec 7 trous identiques, espacés régulièrement (1, 3, 4, 6 sont équidistants et le 7ème au milieu du tuyau) on obtienne sur près de trois octaves, des sons dont les partiels se correspondent suivant les preuves données plus haut. Certes tous les neys ne sont pas parfaits, car il est difficile de trouver un roseau approprié (noeuds régulièrement espacés, inter-noeuds en rapport avec le diamètre du roseau...). Mais la pratique qui consiste à repérer l'emplacement des trous d'après un certain nombre de noeuds offre en plus l'avantage de pouvoir faire sans calculs compliqués des instruments homologues de dimensions diverses.

Une fois de plus l'expérience empirique accumulée sur plusieurs générations a permis de résoudre, avec des moyens simples, des problèmes acoustiques d'une grande complication. Toujours à propos des discontinuités dans la section droite des tuyaux cylindriques nous allons maintenant rendre compte de quelques expériences sur l'agrandissement local de la perce des tuyaux.

2) AGRANDISSEMENT LOCALISE DE LA SECTION DES TUYAUX CYLINDRIQUES

§ 3.39 - Généralités

L. RAYLEIGH (Bib. T.II p. 66-68) donne une équation pour calculer la correction de longueur à apporter aux formules de Bernoulli lorsqu'on veut connaître les fréquences d'un tuyau de section progressivement variable.

La fréquence du tuyau monte quand l'agrandissement est situé à un noeud de vitesse et baisse quand l'agrandissement est situé à un ventre de vitesse.

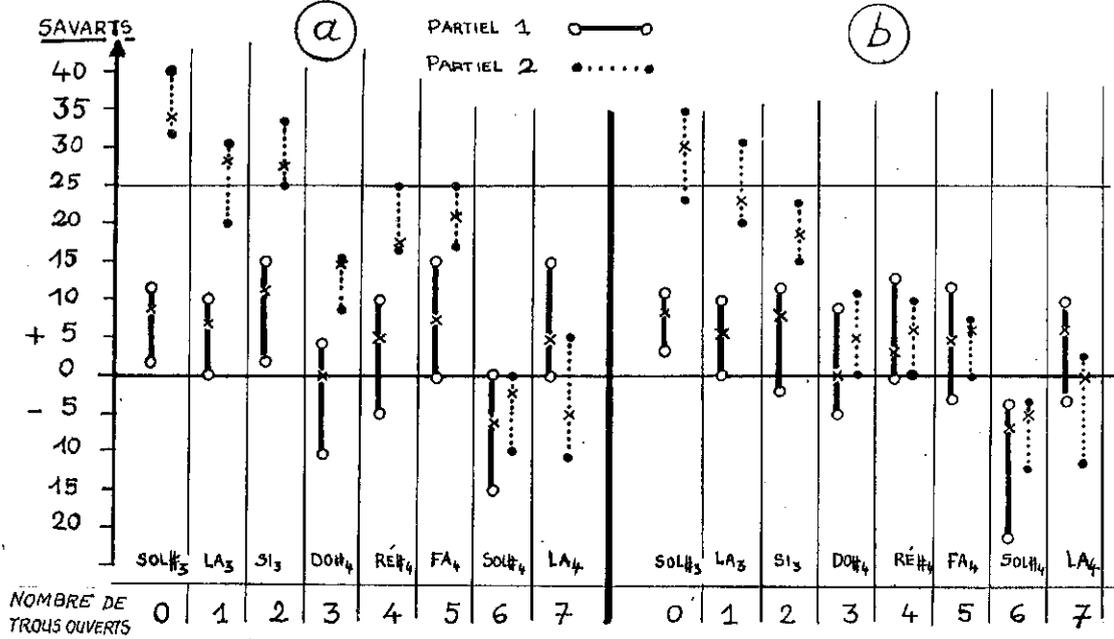
NEDERVEEN (Bib. (1) p.56) reprend et développe les calculs de Rayleigh en utilisant les analogies électriques dans le but de définir les changements de fréquence dus aux cavités déterminées par les trous latéraux des instruments de musique à vent. Il définit un facteur de pénétration du fluide ($0 < \epsilon < 1$) dans ces cavités. Quand ce facteur est grand ($\epsilon = 1$) on se trouve dans le cas d'un changement progressif de section; les modifications de fréquence correspondent à celles que Rayleigh envisage dans sa théorie.

Quand le facteur de pénétration est faible, (ϵ voisin de 0) ce qui est le cas pour les cavités des trous latéraux, on constate que ces cavités provoquent toujours un abaissement de fréquence, quelle que soit leur situation par rapport aux noeuds et ventres de vitesse de l'onde stationnaire du tuyau.

Les agrandissements locaux que l'on rencontre en facture instrumentale de flûtes proviennent soit des irrégularités du matériau naturel employé, soit de certaines dispositions mécaniques de l'instrument, raccorde de tubes, cheminées des trous latéraux. Il s'agit presque toujours de " défauts " qu'il faut éviter ou corriger. Contrairement à ce que nous avons montré pour les rétrécissements, nous ne connaissons pas de cas où un facteur utiliserait les effets d'un agrandissement local pour obtenir un résultat acoustique défini. Le cas particulier des trous des flûtes anciennes, agrandis intérieurement, a été examiné au § 3.10. Nous n'avons pas noté de perturbation par-

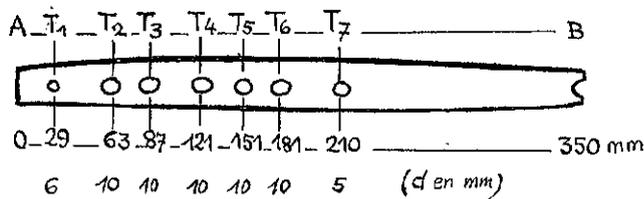
Roseau renflé au milieu

Même instrument corrigé par un manchon interne

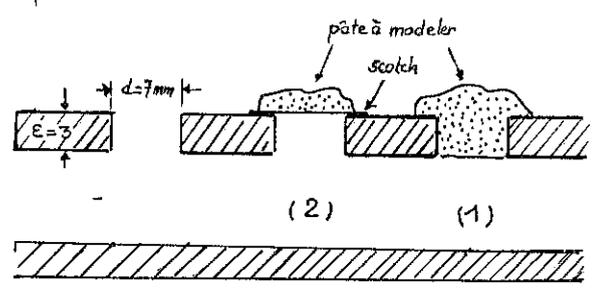
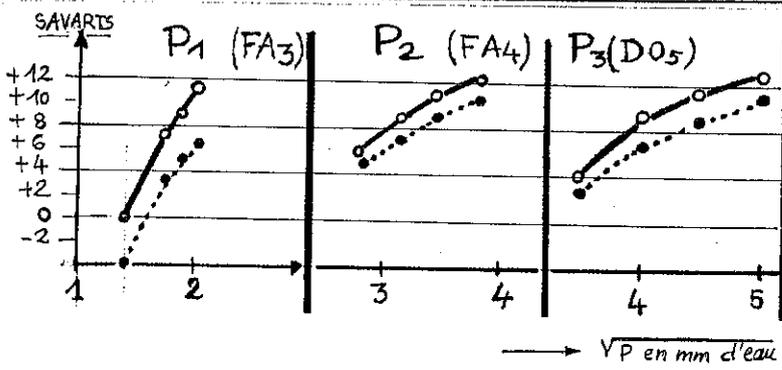


57

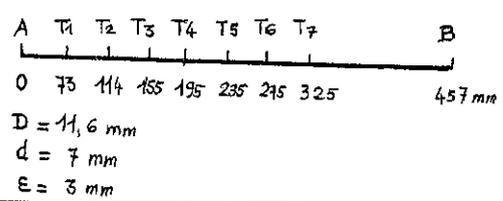
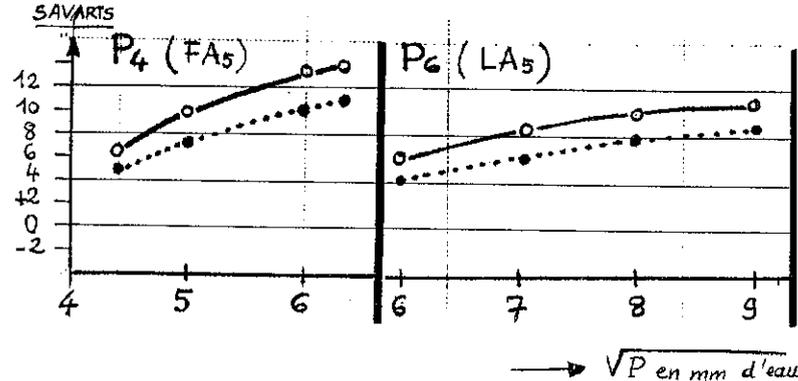
Les noms de notes indiqués ci-dessus correspondent au partiel 1. Pour le partiel 2, lire l'octave supérieure



Diamètre intérieur:
 $D \approx 15 \text{ mm}$ en A et B
 $D \approx 17 \text{ mm}$ au milieu



(1) ○—○ Trous comblés - Pas de cavité
 (2) ●...● Trous bouchés extérieurement cavités internes.



58

ticulière due à la présence des cavités; mais il est vrai que notre expérience ne portait que sur deux trous.

Il faudrait faire une expérimentation systématique. Voici simplement quelques résultats obtenus lors d'expériences concernant des cas pratiques.

§ 3.40 - Tuyau renflé dans sa partie médiane

Lors d'essais menés avec un fabricant de kénas, nous avons tenté d'utiliser du roseau du Var pour la confection de ces instruments. On peut trouver des roseaux dont les noeuds sont suffisamment espacés (300 à 400 mm) pour disposer d'un tube de longueur convenable. Mais le diamètre n'est pas constant : il est plus étroit à proximité des noeuds, ou si l'on préfère, le tube ainsi obtenu est renflé au milieu, entre les noeuds.

fig.57a

Nous donnons fig. 57a les dimensions d'un tel instrument et le champ de liberté en fréquence des deux premiers partiels, lorsqu'on découvre les trous l'un après l'autre; on voit d'emblée que le partiel 2 est beaucoup trop haut; l'écart est compris entre 15 et 30 savarts ! Or il est important, dans ce type d'instrument, que l'intervalle entre les partiels 1 et 2 soit très voisin de l'octave. Le défaut de ces roseaux est rhédibitoire; on comprend pourquoi il n'est pas utilisé pour faire des flûtes.

fig.57b

Pour corriger les effets du renflement nous avons introduit dans le roseau une feuille de mylar enroulée, pratiquement sans épaisseur, et suffisamment rigide pour réaliser un cylindre intérieur du diamètre le plus faible. On peut voir fig. 57b le champ de liberté en fréquence de l'instrument rectifié. Les modifications sont complexes, mais dans l'ensemble l'instrument est plus juste : les sons 3, 4, 5 et 6 octavient correctement.

Nous allons examiner maintenant d'autres cas d'agrandissements locaux.

§ 3.41 - Agrandissements locaux dus aux cavités des trous latéraux bouchés extérieurement

Lorsque les parois d'un instrument sont épaisses, les trous latéraux forment de véritables petites cheminées latérales branchées sur le tuyau principal. Pour avoir une idée de l'allure des perturbations dues à ces cavités, et pour connaître l'ordre de grandeur des phénomènes nous avons fait une expérience.

Soit un tuyau percé de 7 trous muni d'une bouche de pipeau, dont on relève la fréquence des partiels pour certaines valeurs fixes de la pression, dans les deux cas suivants :

- (1) trous complètement obturés, la cheminée étant remplie d'un matériau plastique (cas d'un tuyau sans trou).
- (2) trous obturés au niveau de la paroi extérieure du tuyau laissant ainsi une cavité due à la perce du trou dans l'épaisseur de la paroi.

fig.58

Les résultats comparatifs font apparaître (fig.58) une baisse en fréquence due aux cavités. Cette baisse est plus marquée sur le partiel 1 (4 à 5 savarts); elle est constante pour les 5 autres partiels (2 à 3 savarts).

Lorsque l'instrument a un grand nombre de trous, comme la flûte traversière

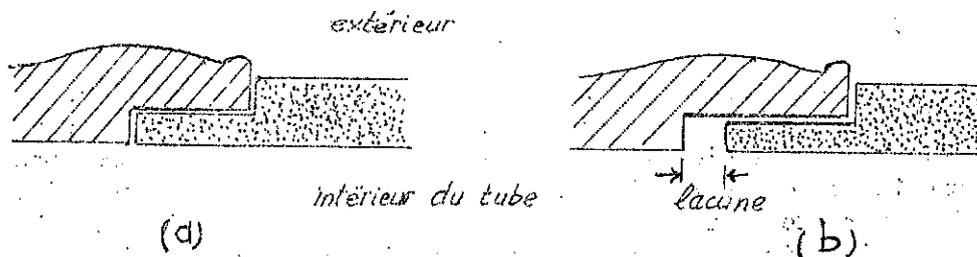
...../

(13 trous), et des cheminées étirées de façon que la surface extérieure du trou soit plane pour recevoir les tampons, l'abaissement dû aux cavités est assez sensible pour qu'il faille en tenir compte.

Mais lorsqu'il s'agit d'instruments sans cléterie, la pulpe des doigts du musicien remplit partiellement les cavités des trous; on peut considérer que les changements de fréquence dus à ces cavités sont alors négligeables eu égard aux fluctuations du champ de liberté en fréquence du musicien.

§ 3.42 - Agrandissement local se produisant au raccord de 2 tubes

Pour des raisons pratiques les flûtes sont souvent faites en 2 ou 3 parties qui se raccordent de la façon suivante :



Si l'instrument est bien fait les 2 parties s'ajustent exactement (a). Mais il peut arriver que la pièce mâle soit plus courte que la pièce femelle (b). Lorsque les deux tubes sont assemblés bout à bout, il subsiste une " lacune " qui provoque un agrandissement annulaire de la section à cet endroit. Pour peu que le tuyau soit étroit les perturbations peuvent être importantes.

Cas d'un galoubet : Rappelons que cet instrument, du type flûte à partiels est muni de trois trous. Les quatre sons fondamentaux (partiels 1) ne sont pas utilisés dans le jeu normal.

fig.59

Nous avons eu entre les mains un galoubet en deux parties, nettement faux, sans raison apparente. Fig. 59 on a porté les champs de liberté en fréquence des partiels donnant les sons successifs de l'instrument; par comparaison avec ceux d'une gamme tempérée de référence (base $LA_3 = 440$ Hz).

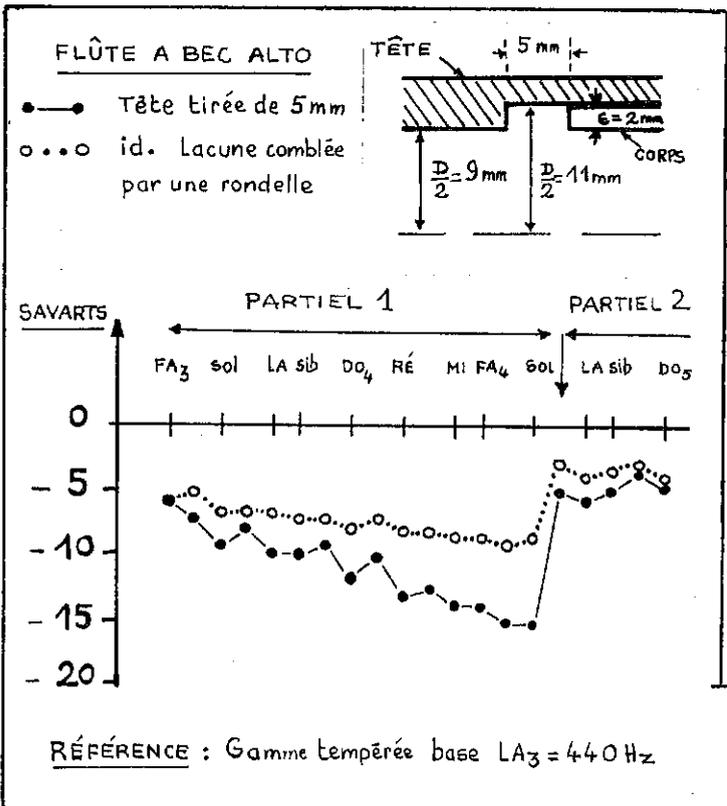
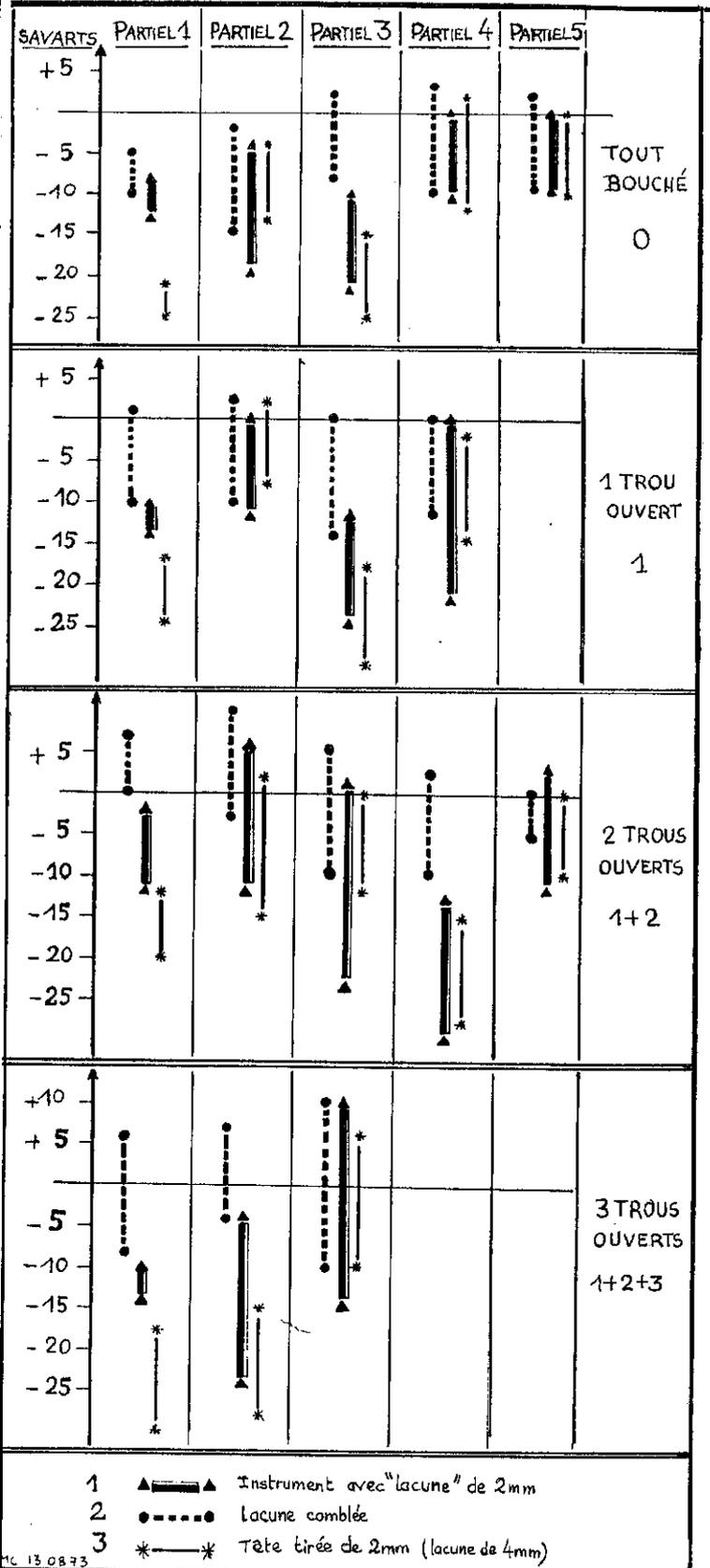
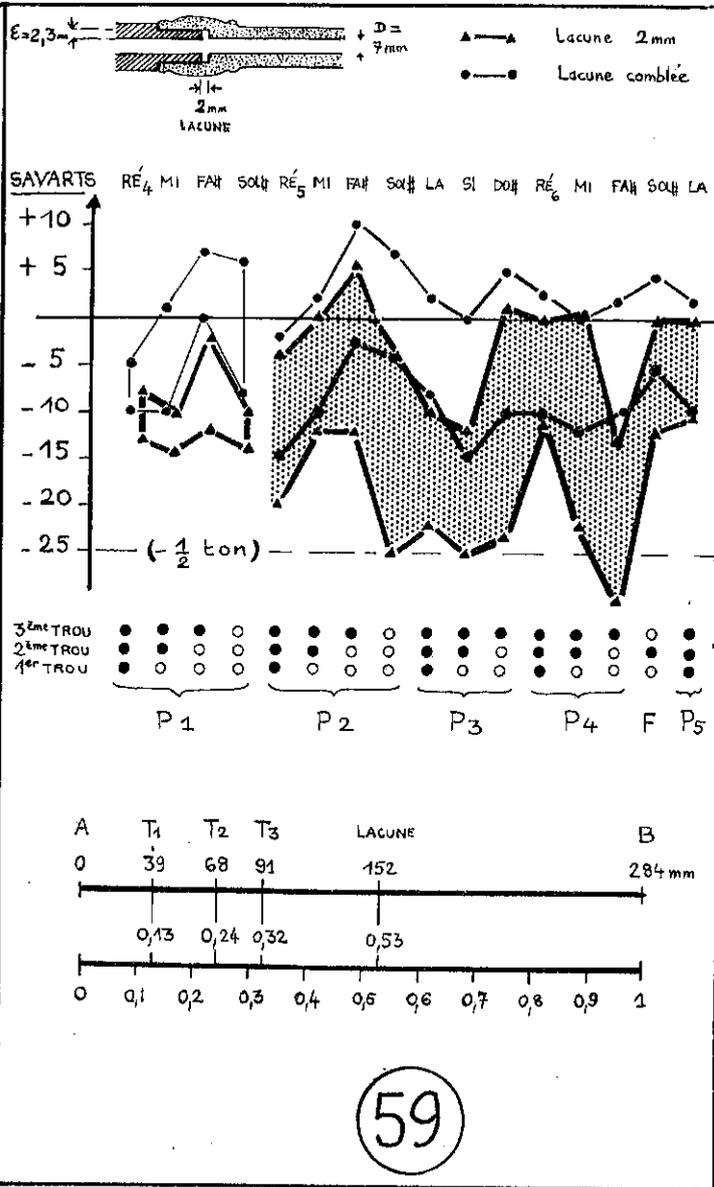
Il n'est pas possible de tracer une droite de la première à la dernière note de l'instrument sans sortir de la zone grisée du champ de liberté. Certaines notes sont beaucoup trop hautes, d'autres trop basses. L'écart maximum est d'un demi-ton entre $FA\sharp_5$ et $FA\sharp_6$! l'instrument est inacceptable.

fig.59

A l'examen de l'instrument nous nous sommes aperçu qu'il restait une lacune intérieure de 2,5 mm lorsque les deux parties de l'instrument étaient emboîtées à fond. Après avoir comblé cette lacune nous avons relevé à nouveau le champ de liberté de fréquences, que l'on peut voir superposé au précédent sur la même figure. Les sons qui étaient trop bas sont corrigés; excepté pour le $FA\sharp_5$, toujours un peu haut, l'instrument est devenu juste.

fig.60

Pour préciser l'effet de la lacune sur la justesse des partiels nous avons représenté côte à côte, fig.60, les champs de liberté des partiels successifs produits pour un doigté donné. L'horizontale de référence d'une série de partiels correspond pour chacun d'eux à la note musicale qu'ils produisent, ex : RE_4 , RE_5 , LA_5 , RE_6 , FA_6 pour les partiels 1,2,3,4 et 5 du doigté " tout bouché ". Si les partiels sont justes on doit pouvoir les relier par une droite horizontale ou légèrement ascendante.



Sur la même figure nous avons représenté les champs de liberté en fréquence des partiels relevés dans les trois cas suivants :

- (1) - instrument avec lacune de 2 mm (traits épais)
- (2) - lacune comblée
- (3) - tête tirée de 2 mm, ce qui porte la lacune à 4 mm.

En comparant (1) et (2) on peut connaître le rôle de la lacune.

Considérons d'abord l'instrument tous les trous bouchés. On voit que l'agrandissement local, situé dans ce cas au milieu du tuyau abaisse les partiels 1 et 3 qui ont un noeud de vitesse à cet endroit. L'abaissement est notable : 1/4 de ton sur le partiel 3. Les partiels 2, 4 et 5 sont pratiquement inchangés.

Avec le 1er trou ouvert les résultats sont similaires. Mais au fur et à mesure que l'on débouche des trous, la position relative de la lacune par rapport aux noeuds et ventres de vitesse des partiels change. Pour deux trous ouverts ce sont les partiels 2 et 4 qui sont fortement abaissés; P2 et P3 le sont aussi, quelque plus faiblement. Et pour trois trous ouverts, la lacune abaisse P1 et P2; P3 n'est plus affecté.

D'une façon générale, le cas (3) (tête tirée) suit les mêmes variations que (2) en les exagérant.

Le cas de ce galoubet est intéressant; il appelle plusieurs remarques :

- un défaut peu visible, d'apparence négligeable, provoque des perturbations importantes dans la justesse de l'instrument, car le rapport $\frac{E}{D} = \frac{2,5}{7}$ est notable. A l'endroit de la lacune le diamètre intérieur passe de 7 à 12 mm !
- En comparant l'instrument, sans et avec lacune, on voit que celle-ci produit toujours un abaissement des partiels.
- La discontinuité étant très localisée, l'abaissement n'affecte que les partiels qui ont un noeud de vitesse à proximité.
- Dans le cas particulier du galoubet où l'on utilise jusqu'au 5ème partiel, le faussement sélectif de quelques uns d'entre eux détruit complètement la justesse de l'instrument.

§ 3.43 - Flûte à bec dont on tire la tête pour baisser le diapason

Les flûtes sont construites pour un diapason donné. Dans la pratique musicale, cependant, les musiciens trouvent légitime de tirer la tête de quelques millimètres pour s'accorder sur un autre instrument légèrement plus bas.

Cette pratique a des incidences multiples. Effectivement, du fait de l'allongement du tube, le diapason général de l'instrument baisse. Mais les proportions entre la bouche et les divers trous changent et les sons correspondant aux trous situés près de l'embouchure sont plus abaissés que les autres. L'instrument est donc faussé. Enfin, en tirant sur la tête d'une flûte, on crée une lacune au raccord des 2 tubes, ce qui intervient aussi dans le faussement de l'instrument, et cela d'autant plus que l'épaisseur des parois est plus grande par rapport au diamètre intérieur du tuyau.

Prenons par exemple une flûte à bec alto en bois, modèle baroque. Pour avoir assez de précision dans les résultats nous avons opéré à pression constante, avec une soufflerie (azote comprimé). Dans un premier temps, on note les pressions nécessaires pour produire sur l'instrument les sons d'une gamme chromatique tempérée à la tempéra-

fig.61 ture ambiante (fig.61). Puis on tire la tête de 5 mm et on excite de nouveau l'instrument aux pressions relevées précédemment. On porte sur un graphique l'écart en savarts des sons ainsi produits avec ceux de la gamme tempérée base $l_3 = 440$ Hz.

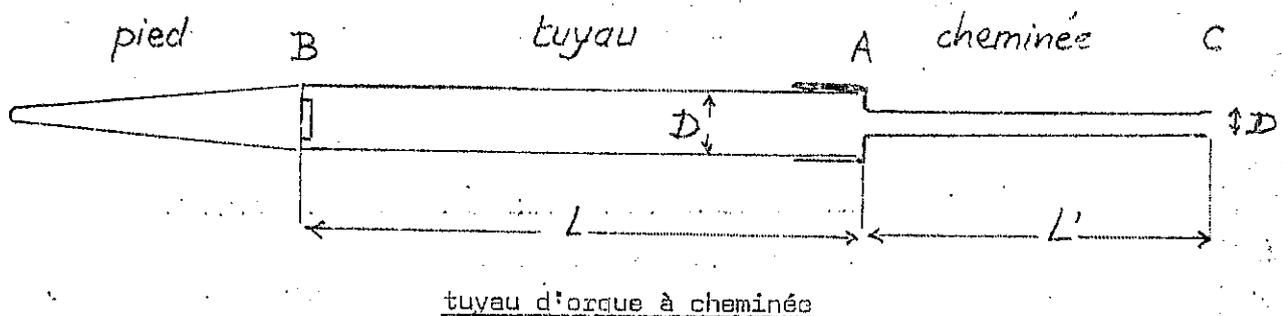
On recommence la même opération après avoir comblé la lacune. La différence des deux courbes met en valeur l'effet de la lacune : elle provoque un abaissement des sons qui croît avec le nombre de trous découverts. Les intervalles musicaux formés par les sons des partiels 1 seront diminués; au contraire, ceux qui se trouvent entre le partiel 1 et le partiel 2 seront agrandis. Ex. : l'octave FA3, FA4 est diminuée de 10 sav. la quinte FA4, DO5 est trop grande de 9 savarts, etc..

On peut en conclure qu'il faut s'abstenir le plus possible de modifier ainsi la géométrie d'un instrument, surtout lorsqu'il s'agit d'une flûte à bec car il n'est guère possible de corriger la hauteur en cours de jeu. Pourtant, à l'époque où le diapason était différent d'un lieu à un autre il était d'usage courant de tirer sur les diverses parties de la flûte pour s'accorder; mais les musiciens avaient bien remarqué les inconvénients provenant de l'agrandissement intérieur à l'endroit du raccord, aussi QUANTZ préconise-t-il à la flûte traversière (chap. I § 13) de "remplir l'espace de dedans (entre la tête et le premier corps) d'un anneau aussi grand que l'adent". Une autre solution consiste à insérer à l'intérieur un tube métallique très mince. On le rencontre fréquemment sur les flûtes traversières en bois fabriquées au XIX^e siècle.

3) ASSOCIATION DE DEUX TUYAUX DE DIAMETRES DIFFERENTS : LES TUYAUX A BOUCHE A CHEMINEE

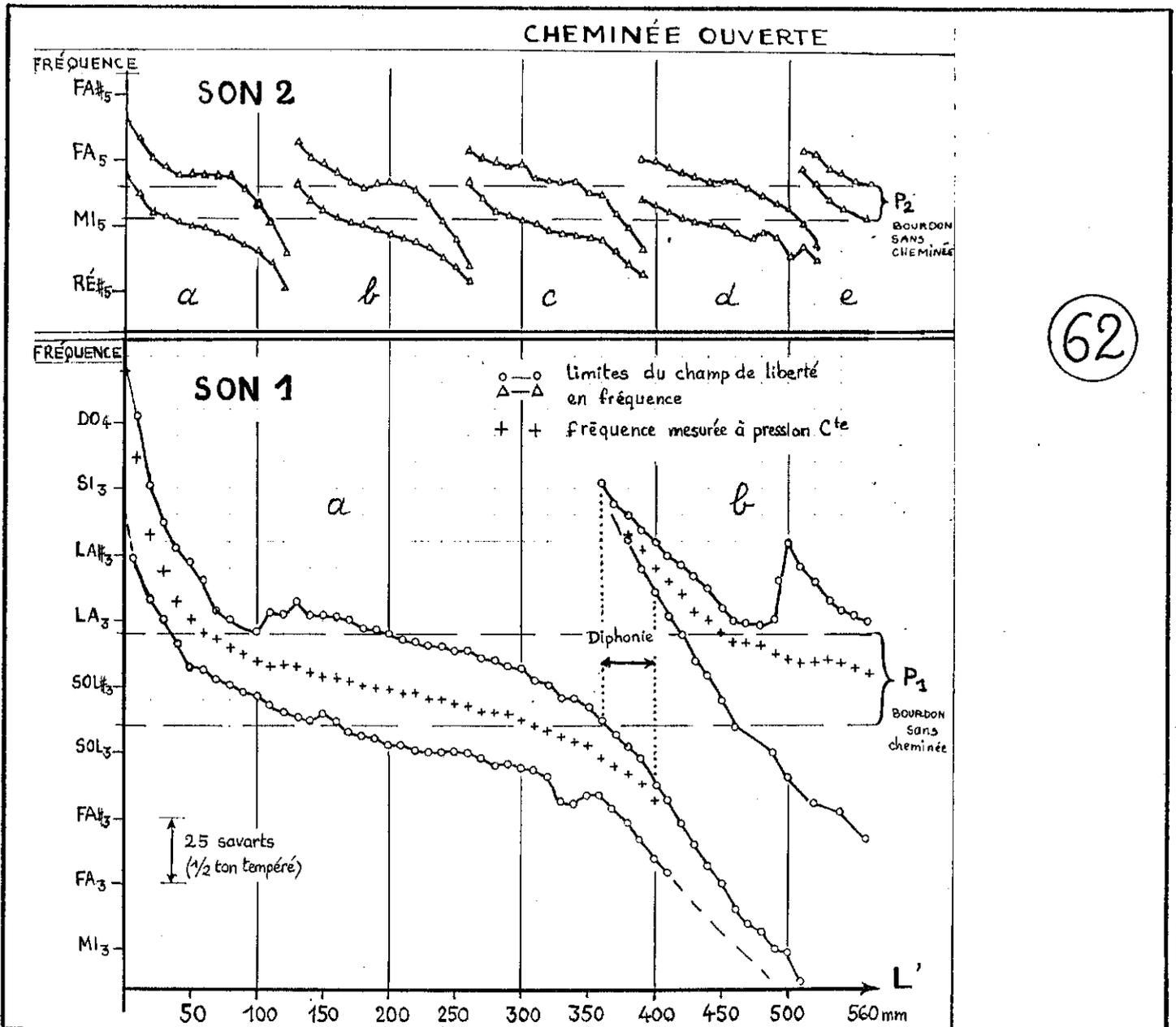
§ 3.44 - Généralités. Définition

Les tuyaux à cheminée consistent dans l'association de deux tuyaux de diamètres différents, coaxiaux. En facture d'orgue, le tuyau de plus gros diamètre est muni du système excitateur lame d'air-biseau : c'est le tuyau proprement dit; la cheminée est plus étroite et plus courte; elle peut être ouverte ou fermée.

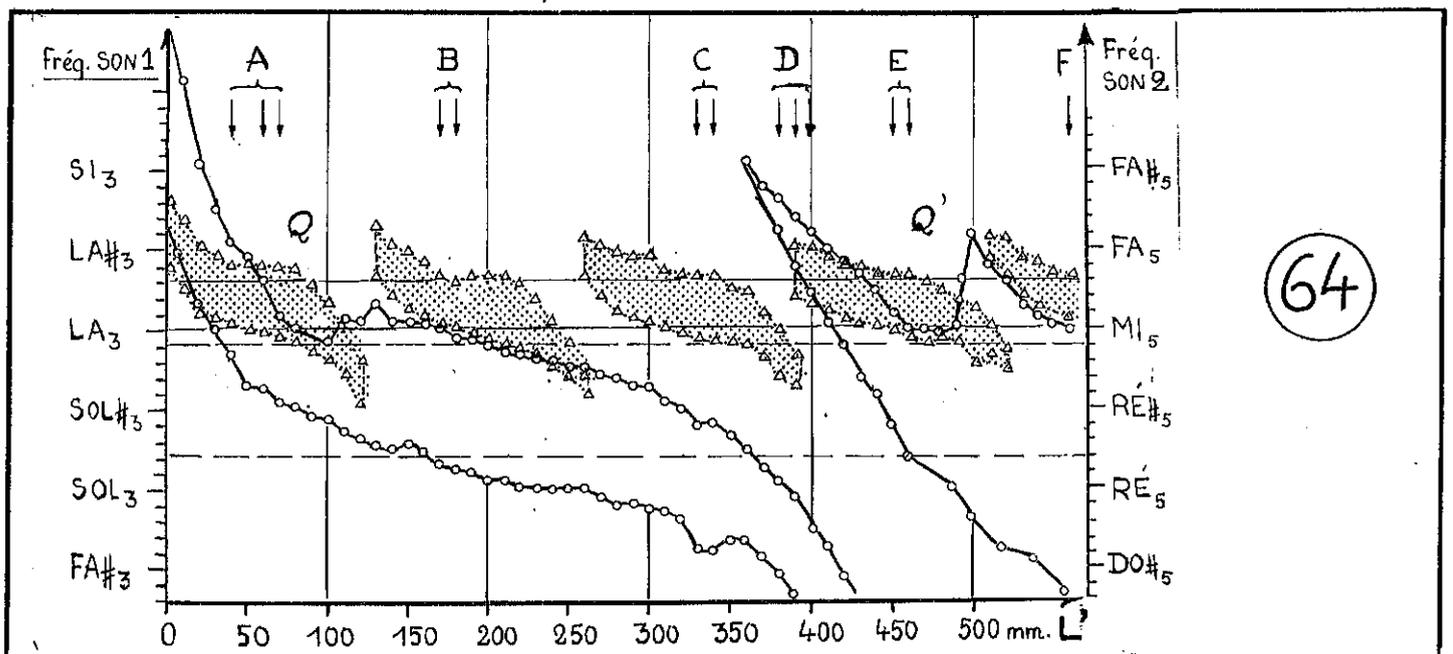


BOUASSE cite à plusieurs reprises les tuyaux à cheminée dans ses ouvrages d'acoustique, en insistant sur le fait qu'ils produisent des "accords faux" faits de plusieurs partiels simultanés non harmoniques. Le phénomène existe, mais seulement pour certaines conditions particulières de l'excitation. En facture d'orgue, nous n'avons jamais entendu de tuyau à cheminée donnant des sons multiples. Ce type de tuyau y est considéré comme intermédiaire entre les tuyaux bouchés (bourdons) et les tuyaux ouverts. Selon les proportions relatives de la cheminée et du tuyau, et en fonction de l'harmonisation de la bouche, ils peuvent tenir de l'un ou de l'autre.

L'étude du timbre des tuyaux à cheminée est donc particulièrement intéressante et nous allons pouvoir, grâce aux possibilités du sonographe, apporter une contribution en ce domaine.



62



64

En premier lieu nous allons rendre compte d'expériences systématiques portant sur les variations de longueur de la cheminée ouverte ou fermée, et sur les proportions de cheminées différentes donnant le même fondamental avec un tuyau donné; puis nous examinerons les effets comparés d'une cheminée ou d'un petit trou dans la calotte d'un bourdon; enfin nous verrons rapidement le cas d'une cheminée intérieure, coulissante pour les besoins de l'expérience. En dernier lieu nous rendrons compte de quelques analyses du timbre de tuyaux à cheminée employés en facture d'orgue.

§ 3.45 - Cheminée ouverte de longueur variable : Fréquence et justesse des partiels.

Prenons un tuyau d'orgue ($D = 33$ mm, $L = 156$ mm) à bouche (5×27 mm) muni d'une cheminée ($D' = 8$, $L' = 560$ mm), près de quatre fois plus longue que le bourdon, que nous allons raccourcir cm par cm.

Le tuyau peut être alimenté soit par de l'azote comprimé de pression variable, soit par de l'air à pression constante provenant d'un réservoir.

Pour chaque longueur de la cheminée on fait les relevés habituels des champs de liberté fréquence-pression des différents sons émis par le tuyau, par pression croissante et décroissante, et pour les deux états, ouvert ou fermé, de la cheminée. De plus, on enregistre sur bande magnétique le son fondamental du tuyau posé sur un mannequin, à pression constante (60 mm d'eau).

Au fur et à mesure que l'on raccourcit la longueur de la cheminée, certains partiels apparaissent, d'autres disparaissent ou subissent des sauts de fréquence.

fig.62

Portons sur un graphique les champs de liberté en fréquence des premiers sons émis par le tuyau en fonction de la longueur de la cheminée (fig.62). Ils affectent l'allure de courbes en "S", discontinues, qui se reproduisent périodiquement à l'intérieur de zones de fréquences relativement étroites. Sur notre figure, l'échelle de fréquence étant logarithmique, ces zones paraissent d'autant mieux définies que l'on va vers les fréquences aiguës. Portons sur la même figure les champs de liberté en fréquence des partiels 1 et 2 du bourdon sans cheminée; on voit qu'ils se placent au centre des zones de fréquences considérées.

Nous conviendrons d'appeler SON 1a, 1b, etc... les partiels qui se trouvent dans la zone du partiel 1 du tuyau bouché, sans cheminée. De même, nous appellerons SON 2a, 2b, etc... les partiels qui se trouvent dans la zone du partiel 2 du bourdon sans cheminée. Le tuyau pouvait aussi émettre des partiels plus aigus, mais fort difficilement; nous nous limiterons à l'étude de ces deux séries de sons.

Considérons tout d'abord le premier son émis par le tuyau, et voyons comment il varie en fonction de L' . Pour plus de commodité nous lirons l'abscisse dans le sens des valeurs croissantes, comme si l'on allongeait graduellement la cheminée.

Quand $L' = 0$ nous avons un bourdon dont la calotte est percée d'un trou de 8 mm; c'est un tuyau partiellement fermé à chaque bout dont la fréquence fondamentale est intermédiaire entre le bourdon et le tuyau ouvert de même longueur.

Quand L' croît, la fréquence du tuyau à cheminée baisse d'abord rapidement, puis on observe un quasi-palier dans la zone de fréquence du partiel 1 du bourdon sans cheminée, et lorsque le son 1 quitte cette zone, l'abaissement devient à nouveau plus rapide. En même temps l'intensité et la stabilité de ce son diminuent assez brutalement pendant qu'apparaît un autre son 1, d'abord plus aigu, et qui progressivement va remplacer le premier. Pour une certaine longueur de la cheminée, ici $360 < L' < 400$ mm on peut même produire simultanément deux sons fondamentaux 1a et 1b distants d'environ une tierce majeure (100 savarts). L' croissant toujours, le son 1b se renforce peu à peu, au détriment du son 1a qui disparaît tout à fait pour $L' = 520$ mm.

...../

fig.63
planche
61

On a porté fig.63 les champs de liberté de pression des deux sons et l'on voit clairement que le son 1b s'établit assez rapidement ($L' = 360$) alors que la stabilité du son 1a ne diminue que graduellement. L'émission polyphonique du tuyau correspond aux valeurs de L' pour lesquelles les deux champs de liberté de pression se chevauchent.

Revenons à la figure 62 où sont indiquées les mesures de la fréquence fondamentale du tuyau joué à pression constante. On constate que ce tuyau à cheminée donne la même note pour deux longueurs différentes de la cheminée.

EX : LA_3 pour $L' = 50$ mm et pour $L' = 440$ mm. Ce phénomène peut sembler paradoxal, d'autant que la théorie prévoit que la fréquence fondamentale d'un tuyau à cheminée baisse indéfiniment avec l'accroissement de longueur de la cheminée. Mais nous avons affaire ici à un tuyau à bouche. Nous reviendrons sur cette question au § 3.50.

En ce qui concerne le son 2 on constate d'une part que sa fréquence baisse avec l'allongement de L' , mais que d'autre part il subit des sauts périodiques à des fréquences supérieures, de sorte que finalement il se trouve toujours dans la même zone de fréquence, celle du partiel 2 du bourdon sans cheminée. Les sauts se produisent respectivement pour $L' = 130$ mm, 260, 390, et 520 mm, soit pour $L' = n \times 130$ mm (n est un nombre entier).

- Justesse relative des sons 1 et 2

fig.64
planche
57

Lorsqu'on joue le tuyau, le son 1 est le fondamental du tuyau. Voyons dans quelle mesure le son 2 s'approche plus ou moins de l'harmonique 3 de ce fondamental pour les différentes longueurs de la cheminée. Pour cela, procédons comme pour un relevé de justesse des partiels. L'intervalle musical compris entre les harmoniques 1 et 3 est une Douzième (475 savarts). Superposons les champs de liberté des deux sons en rapportant sur l'ordonnée du son 1 les fréquences du son 2 diminuées d'une douzième (ce qui revient à diviser par 3 les fréquences du son 2). Nous obtenons la figure 64. Les champs de liberté des deux sons ne coïncident que rarement : pour $10 < L' < 110$ mm et $400 < L' < 520$ mm. En dehors de ces valeurs le son 2 est toujours beaucoup plus haut que l'harmonique 3, excepté pour $L' = 10$ mm. Nous allons voir les conséquences qui en découlent quant au timbre du tuyau.

Aux points Q et Q' indiqués sur la figure on observe des irrégularités dans la limite supérieure du champ de liberté en fréquence du son 1. Elles proviennent des attirances qui se produisent entre les sons 1 et 2, lorsqu'ils se trouvent dans un rapport harmonique. Lorsqu'on augmente la pression, le passage du son 1 au son 2 ne se fait pas franchement. Il existe une zone plus ou moins étendue dans laquelle les 2 sons coexistent; puis, progressivement, l'un s'affaiblit au profit de l'autre. Nous avons pris pour parti d'arrêter le champ de liberté du son 1 à l'apparition du son 2.

fig.63
planche
61

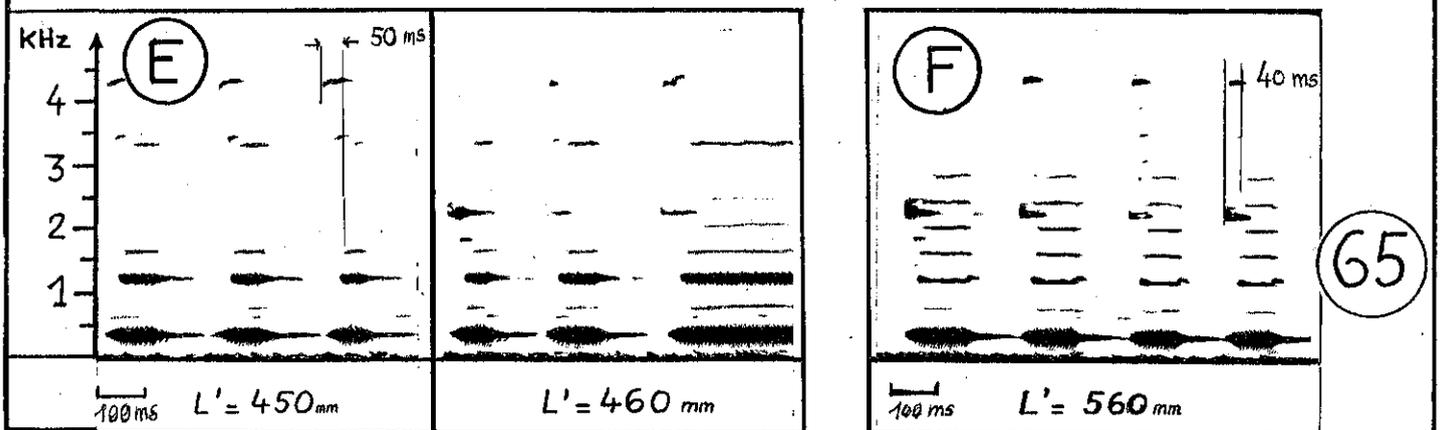
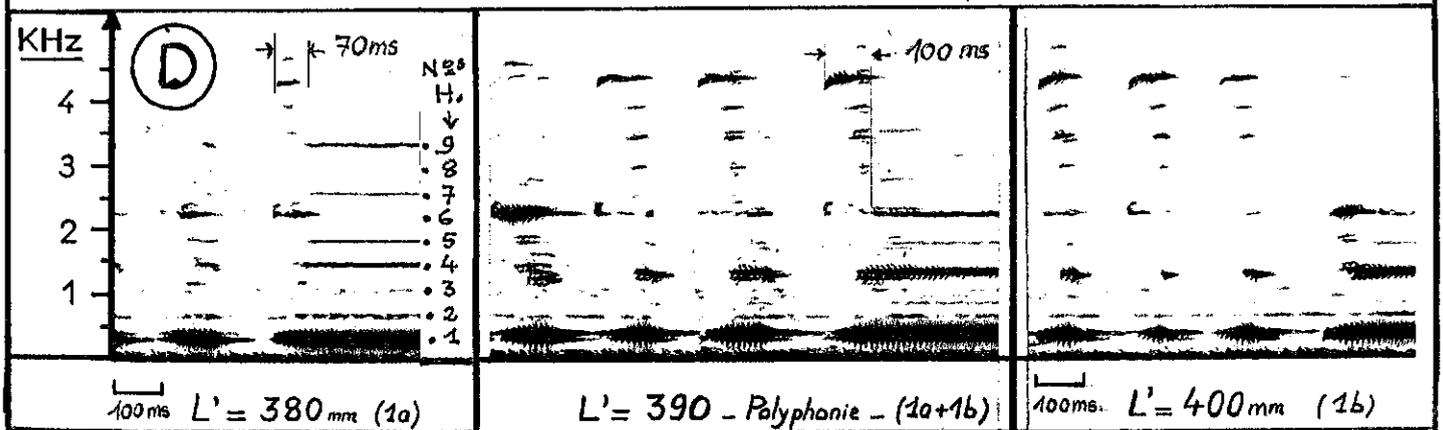
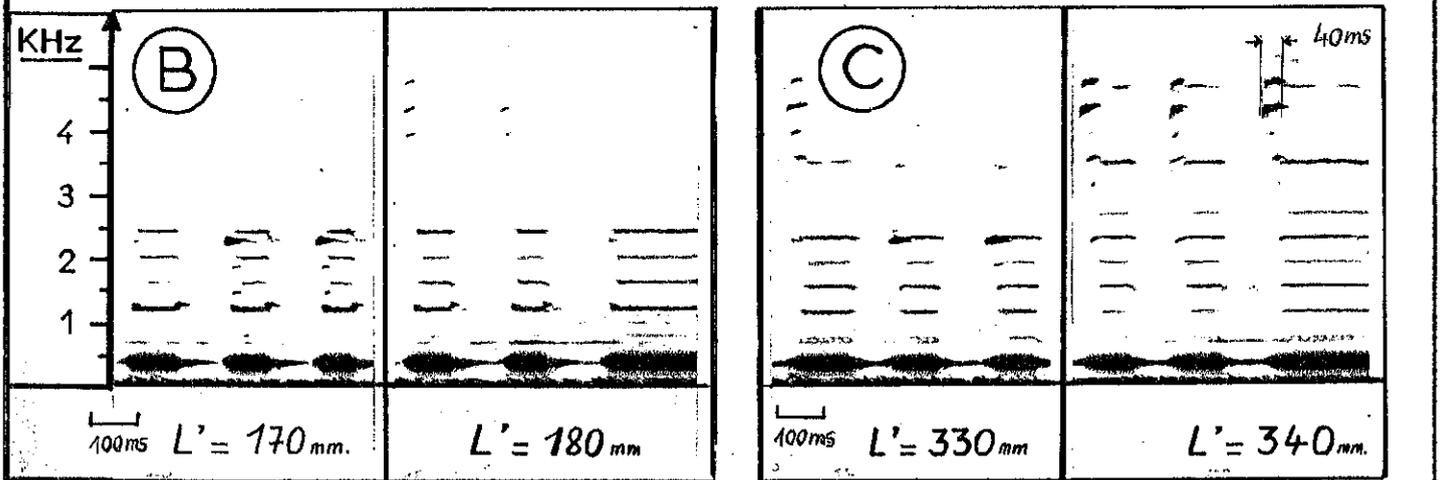
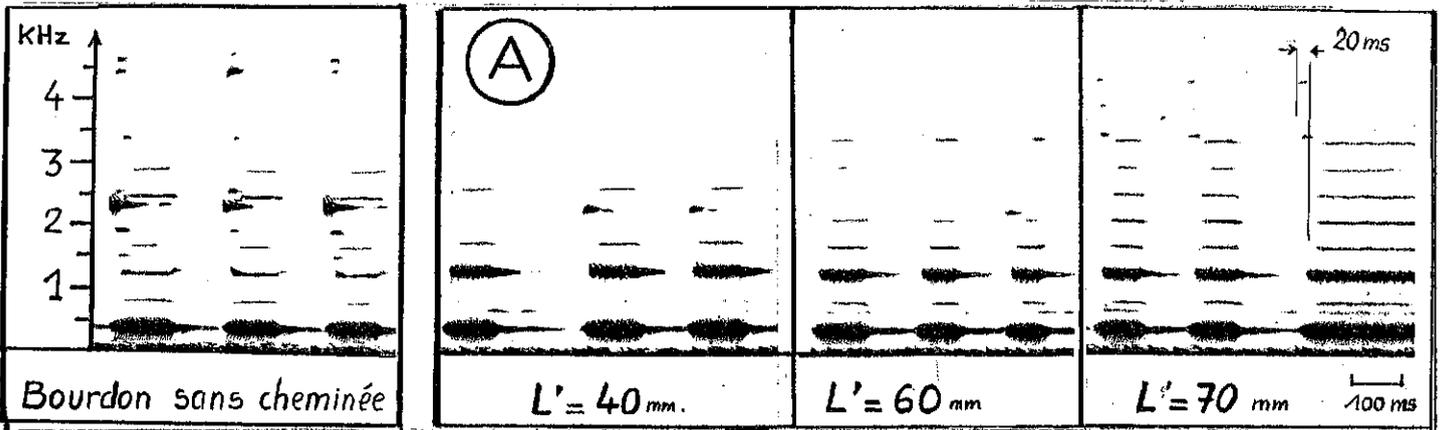
Nous reportant à la figure 63 nous voyons clairement ces zones de transition indiquées par le terme "quintoisement".

§ 3.46 - Variations du timbre du tuyau avec la longueur de la cheminée ouverte

fig.64
et 65
PL.58

Pour chaque valeur de L' nous avons enregistré le son du tuyau posé sur un mannequin alimenté à pression constante (60 mm d'eau). Nous avons choisi 6 groupes de valeurs de L' particulièrement intéressantes, repérées sur la figure 64 par les lettres A, B, C, D, E et F. Les sonagrammes correspondant sont donnés fig.65.

Etant donné que la composition des transitoires d'attaque dépend de la manière dont on enfonce la soupape qui commande l'arrivée d'air au tuyau, nous avons fait figurer pour chaque longueur de la cheminée 3 ou 4 attaques successives du tuyau.



65

La fréquence fixe visible sur toutes les analyse ($\approx 700 \text{ Hz}$) provient du moteur de la soufflerie.

- Commentaire des sonagrammes - fig.65 - PL.58

On voit tout d'abord l'analyse du bourdon sans cheminée. Le timbre est bien caractéristique d'un tuyau bouché : fondamental très intense, harmonique 2 quasiment inexistant; les autres harmoniques apparaissent faiblement. A l'attaque, son de bouche très intense vers 2400 Hz.

fig.64
et 65

- A) - $40 \leq L' \leq 70$ mm. L'harmonique 3 est considérablement renforcé; son intensité est presque aussi grande que celle du fondamental. En nous reportant à la fig.64 nous constatons que les sons 1 et 2 sont dans des rapports harmoniques, ce qui explique le renforcement de l'harmonique 3. Le tuyau " parle bien "; la durée d'établissement du son ne dépasse pas 20 ms. Notons aussi que l'intensité des harmoniques supérieures varie notablement en fonction de la longueur de la cheminée : $L' = 70$, son riche. $L' = 40$, son détimbré.
- B) - $L' = 170$ et 180 mm. Le son 2 est maintenant plus haut que l'harmonique 3 du fondamental et l'on voit bien que l'intensité de cet harmonique est plus faible dans le son du tuyau. Remarquons que le timbre du tuyau est tout à fait comparable à celui du bourdon sans cheminée, pour lequel l'écart entre le partiel 2 et l'harmonique 3 du fondamental est du même ordre de grandeur.
- C) - $L' = 330$ et 340 mm. L'écart entre le son 2 et l'harmonique 3 s'est encore accru : ce dernier est très faible, au profit des harmoniques 9 et 12 qui sont apparus. La durée d'attaque du tuyau atteint 40 ms. En particulier, l'intensité du fondamental s'établit plus graduellement, ce que l'on remarque à sa forme en fuseau plus effilé.
- D) - $380 \leq L' \leq 400$ mm. Il s'agit ici de la transition entre les sons 1a et 1b. D'une façon générale le tuyau parle très mal. La durée d'établissement du son est comprise entre 70 ms et 100 ms. En jeu détaché on n'obtient pratiquement que le son de bouche et le fondamental. Pour $L' = 380$ mm le tuyau produit un harmonique 4 intense, ce que l'on comprend si on se reporte à la figure 17. Le son 2 est, pour cette valeur de L' , plus proche de l'harmonique 4 que de l'harmonique 3 du fondamental.
- $L' = 390$. Le tuyau émet simultanément deux sons fondamentaux : 1a = FA3 + 7 savarts et 1b = LA # 3 - 5 savarts, accompagnés de sons différentiels et additionnels. La durée d'établissement du son est très grande.
- $L' = 400$ mm. A l'attaque le tuyau accroche encore le son 1a, mais il se stabilise sur le son 1b uniquement.
- E) - $L' = 450$ et 460 mm. Le fondamental et le son 2 étant de nouveau dans un rapport harmonique, on voit réapparaître l'harmonique 3. En comparant le timbre du tuyau à cheminée en E et en A on note de grandes similitudes, cependant l'attaque a une plus grande durée quand la cheminée est plus longue.
- F) - $L' = 560$ mm. Ce point est comparable au point B excepté l'attaque qui comporte un son de bouche important en intensité et en durée.

Ces analyses présentent un grand intérêt du point de vue de l'étude du timbre. Tout au long de l'expérience, les conditions d'enregistrement et de jeu du tuyau

...../

sont restées strictement identiques. La pression d'alimentation du tuyau et les dispositions de la bouche n'ont pas été modifiées. La seule variable est la longueur de la cheminée, ce qui entraîne un changement de la hauteur du fondamental et des rapports de fréquence des partiels du tuyau. Or les conséquences qui en résultent quant au timbre du tuyau sont assez considérables.

En résumé, le timbre de base du tuyau est celui d'un tuyau bouché, caractérisé principalement par un fondamental très intense, et par l'absence d'harmonique 2. L'harmonique 3 est plus ou moins intense selon les rapports de fréquence des sons 1 et 2. Le son de bouche est invariable en fréquence, ses deux composantes principales étant situées vers 2400 et 4400 Hz. Mais selon la hauteur du fondamental et les proportions de la cheminée le son de bouche accroche tel ou tel partiel, ce qui produit d'assez grandes différences dans l'attaque du tuyau. Enfin, entre les points A et E pour lesquels se reproduisent les mêmes conditions d'harmonicité des partiels, la seule différence provient de l'attaque. Il semble qu'une trop grande longueur de la cheminée gêne la mise en route du tuyau.

Avant de terminer ce paragraphe sur le timbre du tuyau à cheminée ouverte, rappelons les hypothèses d'HELMOLTZ et de BOUASSE.

En examinant des tuyaux à cheminée HELMHOLTZ (Bib. chap V § 5) remarque que la fréquence propre des cheminées est à l'unisson de l'harmonique 5 des tuyaux. Il en conclut que l'harmonique 5 doit être relativement plus intense que l'harmonique 3, ce qui doit donner un timbre particulièrement "brillant". La cheminée jouerait le rôle d'un petit résonateur renforçant l'intensité de l'harmonique sur lequel on l'accorde. Au cours de notre expérience nous avons relevé, pour chaque longueur de L' , les fréquences propres de la cheminée en soufflant dans le plan de l'extrémité ouverte. Nous donnons, fig. 66 l'analyse du tuyau pour $L' = 70$ mm, $L' = 180$ mm et $L' = 450$ mm et les fréquences correspondantes de la cheminée. Il n'y a pas de relation évidente entre les fréquences de la cheminée et le renforcement de tel ou tel partiel du tuyau.

fig. 66
planche
59

BOUASSE (Bib. (2) § 167) s'appuie sur un mémoire de GERHARDT pour affirmer que "les tuyaux à cheminée sont caractérisés non par l'intensité relative de tel ou tel partiel (le partiel 5 suivant HELMHOLTZ) mais par l'obtention d'un accord faux dont les notes constituantes aiguës sont assez faibles et distantes du fondamental".

Les moyens modernes d'analyse dont nous disposons nous ont permis de montrer qu'il n'en est rien. Le son du tuyau entretenu est périodique; mais le contenu harmonique diffère sensiblement de celui d'un tuyau bouché (bourdon) en raison des rapports non harmoniques des partiels. La diphonie n'existe que pour certaines proportions de la cheminée; le son du tuyau est alors assez instable, et l'attaque en est difficile. A notre connaissance, les tuyaux à cheminée "diphoniques" ne sont pas utilisés en orgue.

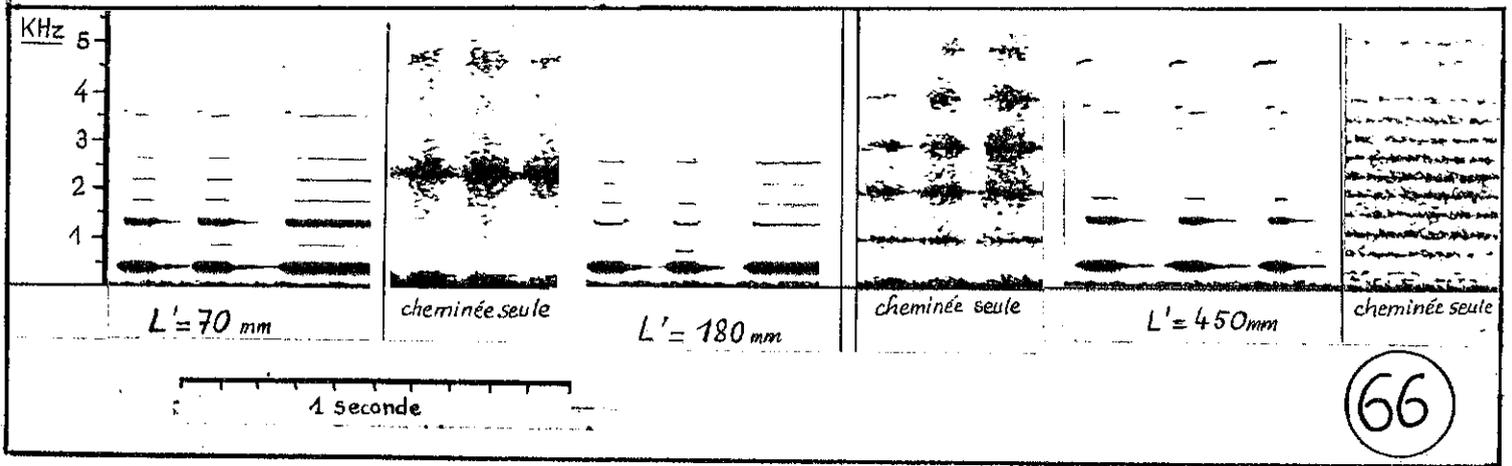
§ 3.47 - Cheminée fermée de longueur variable : fréquence des partiels et timbre

Nous avons fait les mêmes relevés de pression, de fréquence et nous avons également enregistré le tuyau en bouchant la cheminée. Les résultats sont donnés (fig. 67). De même que pour le tuyau à cheminée ouverte on obtient des séries discontinues de partiels dont les fréquences s'écartent peu des partiels du bourdon sans cheminée. Il s'agit aussi de courbes en S. Pour le son 1, la fréquence est initialement la même que celle du bourdon sans cheminée. Elle décroît avec l'allongement de la cheminée, d'abord faiblement avec l'allongement de L' , et plus rapidement lorsqu'elle est inférieure au partiel. Puis brusquement la fréquence subit un saut et amorce une nouvelle portion de courbe.

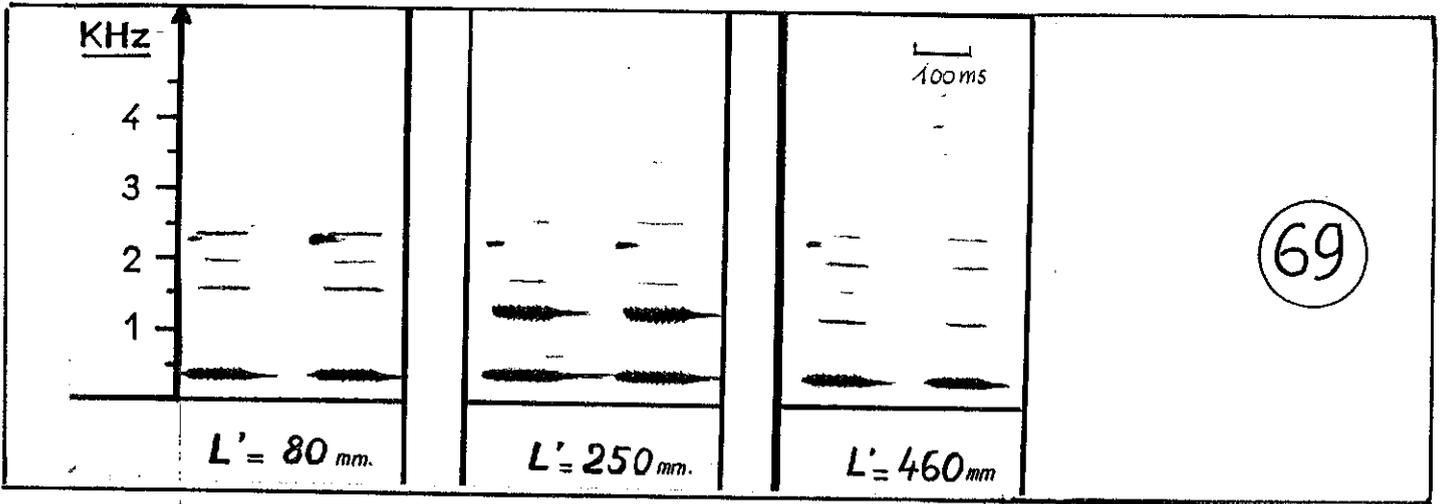
fig. 67
Pl. 60

En comparant les figures 67 et 62 on constatera qu'elles se superposent à

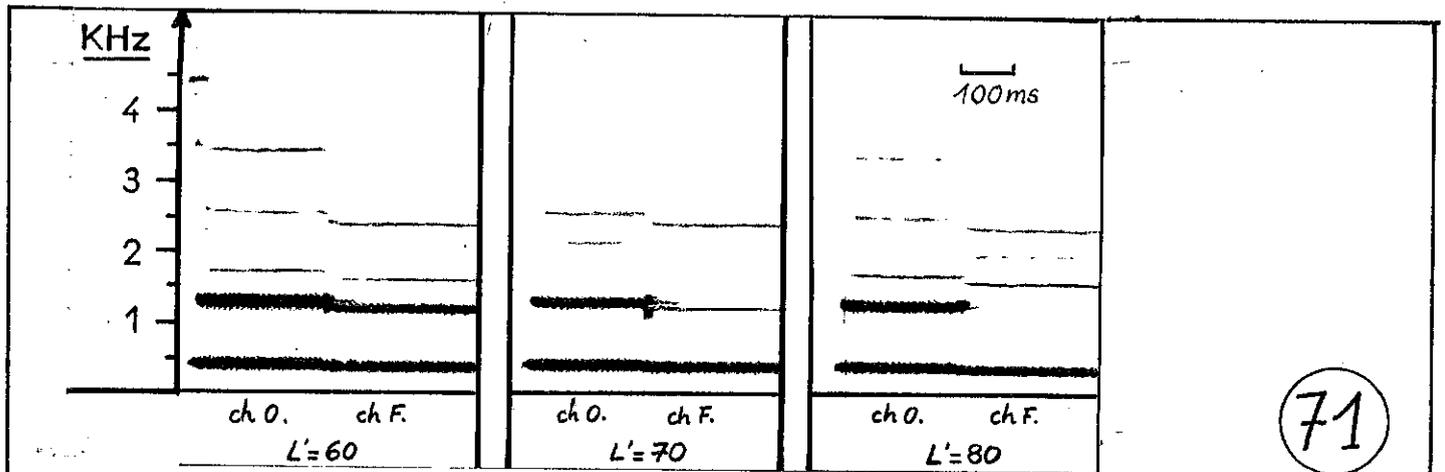
.../



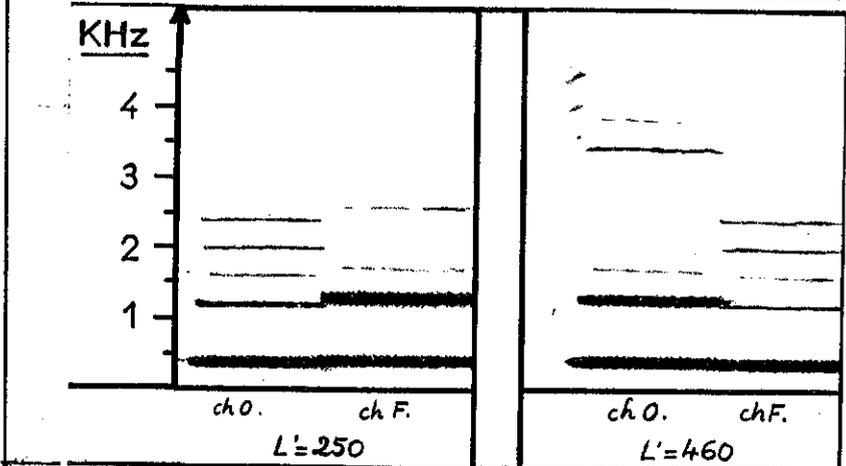
66



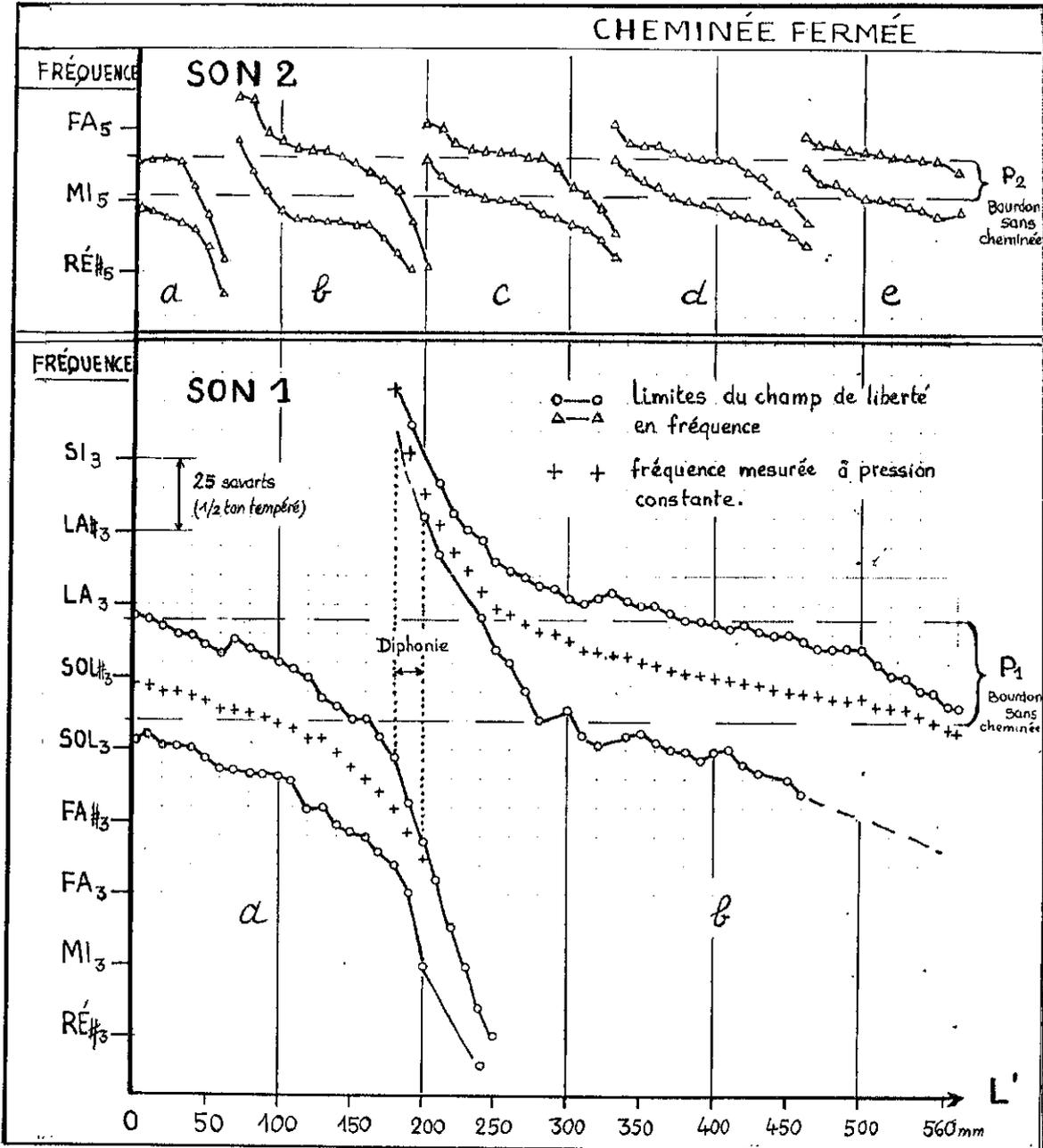
69



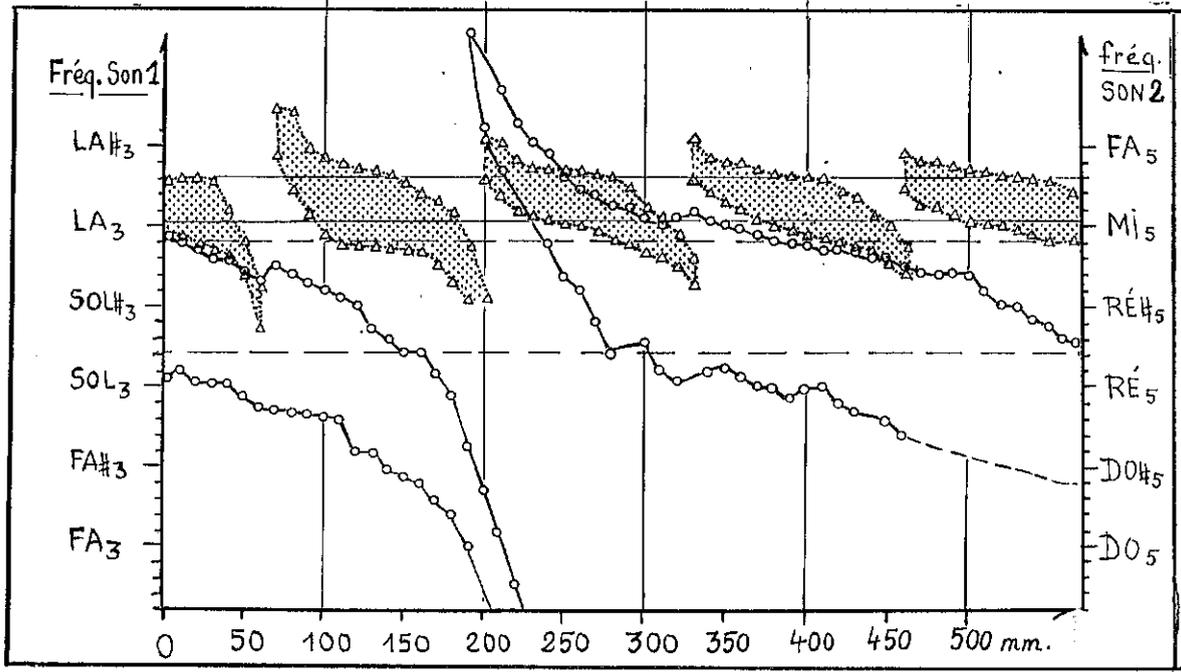
71



CHEMINÉE FERMÉE



67



68

peu près exactement si on décale une des deux abscisses d'environ 200 mm.

Notons que le tuyau est polyphone pour $180 \leq L' \leq 200$ mm

- Justesse relative des sons 1 et 2

fig.68
Pl. 60

De même que pour le tuyau à cheminée ouverte nous pouvons apprécier l'écart du son 2 avec l'harmonique 3 du fondamental en nous reportant au diagramme de la figure 68. Pour les valeurs de L' correspondant à notre expérience, les champs de liberté des deux sons ont peu de points communs. La coïncidence la plus notable se produit pour $210 \leq L' \leq 330$, ce qui correspond vraisemblablement à un timbre riche en harmonique 3.

- Variation du timbre du tuyau

fig.69
Pl. 59

Il n'est pas nécessaire de refaire l'étude détaillée; nous donnons seulement trois exemples (fig.69) qui confirment ce que nous avons vu : quand un partiel se trouve voisin d'un multiple du fondamental, l'harmonique correspondant est renforcé. On vérifiera que l'on peut prévoir l'intensité de l'harmonique dans le son du tuyau à cheminée fermée analysé aux points A, B et C, à partir du diagramme de justesse du son 2 (fig.68).

§ 3.48 - Cheminée de longueur donnée, ouverte ou fermée; timbre du tuyau

fig.70
planche
61

Dans certains cas très particuliers il peut arriver qu'on utilise un même tuyau d'orgue pour émettre deux notes différentes, par exemple DO et DO \sharp voisins que l'on ne joue pratiquement jamais simultanément. Un tel tuyau est qualifié de polyphone (cf. BOUASSE (2), p. 325). On peut par exemple, percer un trou près de l'extrémité et à l'aide d'un mécanisme approprié qui bouche ou non le trou, obtenir la note que l'on désire. L'idée peut venir aussi d'utiliser un tuyau à cheminée dont on boucherait ou déboucherait l'extrémité de la cheminée. En effet, portons sur une figure (fig.70) les fréquences de notre tuyau à cheminée joué à pression constante, pour les différentes valeurs de L' , et pour les deux états de la cheminée. Nous voyons que le son du tuyau, cheminée ouverte, est tantôt plus haut, tantôt plus bas que celui du tuyau cheminée fermée. L'intervalle maximum est une 3^e majeure (100 savarts) dans les conditions de notre expérience. On peut aisément choisir L' pour que le tuyau baisse d'1/2 ton quand on bouche la cheminée, par exemple en prenant $L' = 30$ ou $L' = 390$.

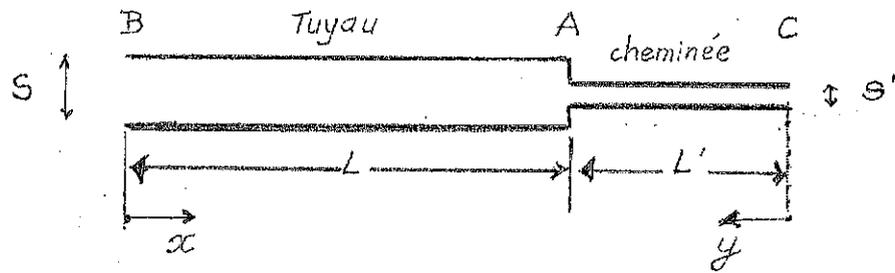
fig.71
planche
59

Malheureusement, le timbre du tuyau change de façon considérable quand on modifie l'ouverture de la cheminée, les rapports de fréquence des partiels n'étant pas les mêmes dans les 2 cas. On peut s'en convaincre en examinant les sonagrammes de la figure 71. Les modifications les plus importantes portent sur l'intensité de l'harmonique 3 et la richesse en harmoniques élevés. Or il est impératif que tous les tuyaux d'un même jeu d'orgue aient un timbre similaire. Les organiers y parviennent en choisissant les tailles des tuyaux de façon appropriée et en agissant sur la bouche au moment de l'harmonisation. Dans le cas du tuyau à cheminée ouverte ou fermée, toute action pour modifier les rapports des partiels est impossible, et la bouche reste bien entendu identique. On comprend pourquoi l'idée d'utiliser un tuyau pour produire deux notes voisines a été abandonnée.

Nous allons voir maintenant comment on peut interpréter les résultats de cette expérience en fonction des données théoriques sur le fonctionnement des tuyaux à cheminée.

§ 3.49 - Rappel de la théorie élémentaire des tuyaux à cheminée.

Soit un tuyau à cheminée B-A-C (figure ci-dessous)



BERNOULLI admet que les ondes restent planes jusqu'au plan de raccordement \$A\$ et pose que les débits sont les mêmes dans les deux tuyaux, au voisinage de \$A\$.

Ce que l'on traduit par : $us + u's' = 0$

\$s\$ est la section du tuyau, \$s'\$ celle de la cheminée, \$u\$ et \$u'\$ les vitesses au voisinage de \$A\$ mesurées respectivement selon \$x\$ et \$y\$.

Examinons le cas du tuyau à cheminée ouverte.

Les potentiels qui satisfont aux conditions aux limites et donnent la même pression dans le plan \$A\$, et des pressions nulles aux extrémités ouvertes \$B\$ et \$C\$ s'écrivent (BOUASSE (2) § 164)

$$\Phi = \sin kL' \sin kx \quad \text{où } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\Phi' = \sin kL \sin ky$$

Exprimons les vitesses \$u\$ et \$u'\$

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = k \sin kL' \cos kx$$

$$u' = \frac{\partial \Phi'}{\partial y} = k \sin kL \cos ky$$

pour \$x = L\$ et \$y = L'\$ la condition de Bernoulli s'écrit :

$$ks \sin kL' \cos kL + ks' \sin kL \cos kL' = 0$$

En divisant les deux membres de l'équation par \$k \cos kL \cos kL'\$

on obtient : $s \cdot \text{tg} kL' + s' \cdot \text{tg} kL = 0$ $\text{Pc} \tan \frac{s'}{s} = \epsilon$ et $kL = \theta$ $kL' = \theta'$

on a

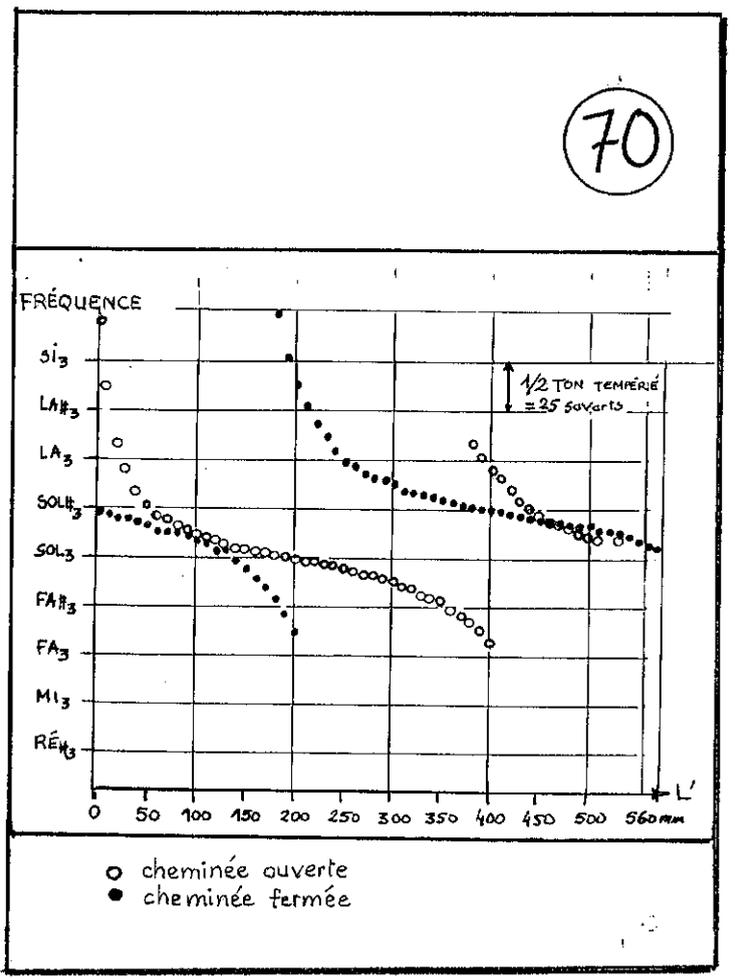
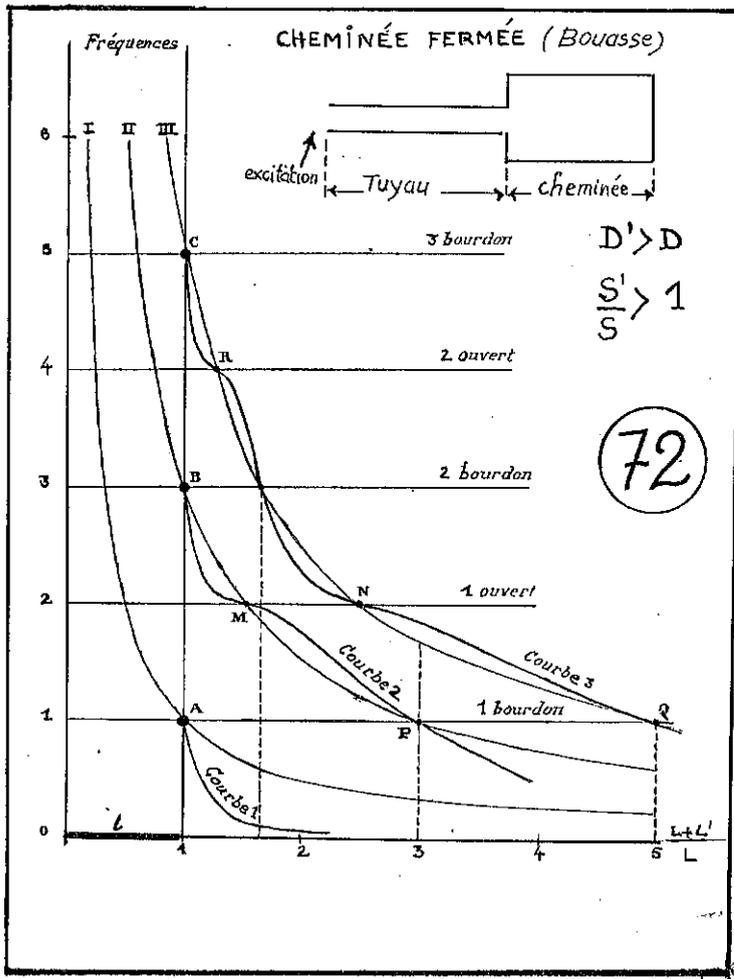
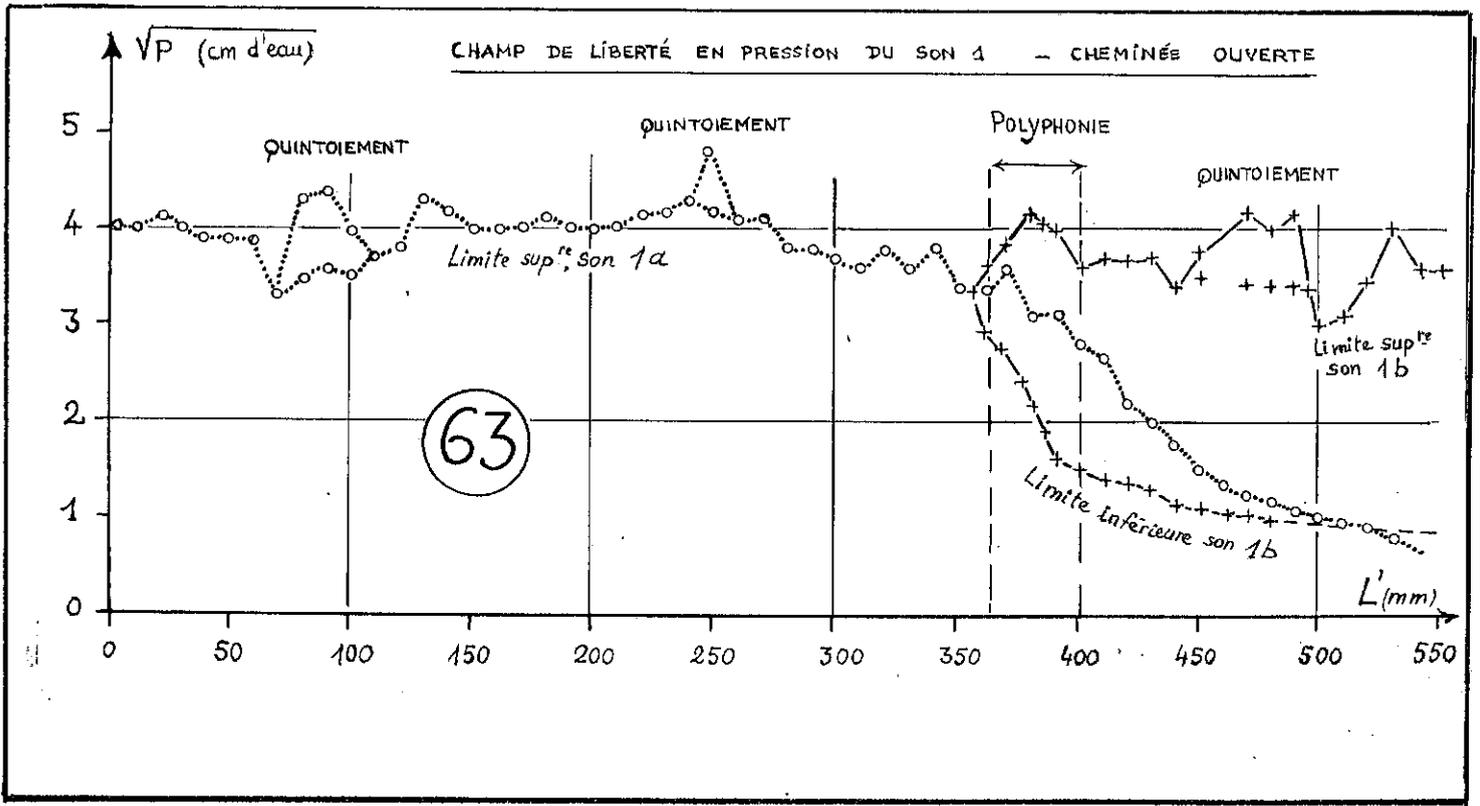
$$\boxed{\epsilon \text{tg} \theta' + \text{tg} \theta = 0}$$

- Tuyau à cheminée fermée

On a les potentiels :

$$\Phi = \cos kL' \sin kx$$

$$\Phi' = \sin kL \cos ky$$





et les vitesses

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = k \cos kL' \cdot \cos kx$$

$$u' = \frac{\partial \Phi'}{\partial y} = -k \sin kL \cdot \sin ky$$

Dans le plan A, la condition de Bernoulli s'écrit :

$$ks \cos kL' \cdot \cos kL - ks' \sin kL \cdot \sin kL' = 0$$

$$1 - \frac{s'}{s} \operatorname{tg} kL \cdot \operatorname{tg} kL' = 0 \quad (\text{on divise par } ks \cdot \cos kL \cdot \cos kL')$$

$$\sigma \operatorname{tg} \theta \cdot \operatorname{tg} \theta' = 1 \quad \operatorname{tg} kL = \theta \quad \operatorname{tg} kL' = \theta' \quad \frac{s'}{s} = \sigma$$

Les formules donnant les fréquences propres des tuyaux à cheminée sont donc :

cheminée ouverte :

$$\sigma \operatorname{tg} kL + \operatorname{tg} kL'_1 = 0$$

cheminée fermée :

$$\sigma \operatorname{tg} kL \cdot \operatorname{tg} kL'_2 = 1$$

On passe de l'une à l'autre en posant $L'_1 = L'_2 + \frac{\lambda}{4}$

- Tuyau à cheminée de longueur variable L'

fig.72

BOUASSE (2) § 171 bis) donne le schéma des courbes de variation en fréquence des partiels dans le cas d'un tuyau à cheminée bouchée dont la section, s' , est supérieure à celle du tuyau (fig.72). Les courbes ont pour canevas les hyperboles relatives au bourdon de section uniforme, s , et de longueur $L + L'$, dont l'équation générale

$$\text{est : } N = (2p - 1) N_0 \frac{L}{L + L'}$$

Elles passent réellement par les points d'intersection de ces hyperboles avec les horizontales menées pour chaque multiple de la fréquence fondamentale du bourdon sans cheminée. En dehors de ces points particuliers les courbes sont tantôt au-dessus, tantôt au-dessous des hyperboles.

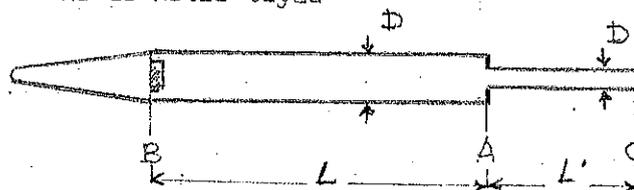
Le sens des concavités s'inverse quand le rapport $\frac{s'}{s}$ devient plus petit que 1.

On constate donc que les fréquences des partiels du tuyau diminuent avec l'allongement de la cheminée. Ces partiels sont assez éloignés d'une série harmonique. Ils le sont d'autant plus que les sections des deux tuyaux sont plus différentes. Revenons maintenant aux résultats de notre expérience.

§ 3.50 - Interprétation des résultats expérimentaux en fonction des données théoriques

Rappelons les dimensions de notre tuyau

$$\sigma = \frac{s'}{s} = \frac{(7,2)^2}{(33)^2} = 0,047$$



L = 153 mm

D = 33

D' = 7,2 mm

Pour construire le réseau de courbes des partiels il convient tout d'abord d'évaluer la longueur acoustique (\mathcal{L}) d'un bourdon sans cheminée, AB, c'est-à-dire la longueur d'un bourdon équivalent, sans bouche, ayant la même fréquence fondamentale. On mesure la fréquence de résonance du fondamental du bourdon AB; on trouve $N_0 = 425$ Hz (Sol $\sharp_3 + 10$ savarts) et on en tire la longueur acoustique du tuyau équivalent

$$\text{soit : } \mathcal{L} = \frac{\lambda}{4} = \frac{v}{4N} = \frac{340}{4 \times 425} = 0,2 \text{ m ou } 200 \text{ mm}$$

C'est une valeur approchée, mais qui va nous permettre de construire les hyperboles, canevas des courbes de fréquence.

- Cheminée ouverte - Traçons les courbes d'équation :

$N = p N' \frac{L}{L + L'}$ où N' est la fréquence du tuyau sans bouche, ouvert aux deux bouts, de longueur $\mathcal{L} = 200$ mm, soit 850 Hz, et p le numéro du partiel. Pour plus de commodité nous conserverons l'échelle de fréquence logarithmique indiquée en notes de musique (fig. 73).

En transformant l'équation $6 \operatorname{tg} \vartheta + \operatorname{tg} \vartheta' = 0$

on obtient : $0,047 \operatorname{tg} \vartheta = - \operatorname{tg} \frac{L'}{\mathcal{L}} \vartheta$ où $\vartheta = \frac{2\pi \mathcal{L}}{\lambda}$ donc $N = 4,72 \vartheta$

fig. 73

Nous avons résolu géométriquement l'équation pour quelques valeurs remarquables du rapport $\frac{L'}{\mathcal{L}}$ et porté les solutions sur la figure 73. Ces points nous permettent d'esquisser les courbes d'évolution en fréquence des partiels. Portons maintenant sur la même figure les champs de liberté des sons 1 et 2 émis par le tuyau à bouche.

On voit immédiatement que certaines portions seulement des courbes théoriques des partiels sont émises par le tuyau. Bien des points calculés se placent tout à fait en dehors du champ de liberté. On remarque également que les sons 1a et 1b sont respectivement les partiels 1 et 2 du tuyau; ils appartiennent à deux courbes distinctes, ce qui explique les sauts en fréquence et la possibilité d'émission simultanée des deux sons. Les sons 2a, 2b, 2c, 2d et 2e sont respectivement les partiels 2, 3, 4, 5 et 6 du tuyau de longueur $L + L'$.

Pour le son 1, les points calculés se placent bien dans le relevé expérimental, excepté pour les très petites valeurs de L' . En particulier pour $L' = 0$, notre bourdon n'est que partiellement ouvert du côté de la calotte, alors que la théorie considère un tuyau ouvert aux deux bouts. Il serait nécessaire d'introduire une correction faisant intervenir $\epsilon = \frac{S'}{S}$. Pour le son 2 les points calculés sont nettement plus bas que les résultats expérimentaux, en raison de l'inharmonicité des partiels d'un tuyau à bouche. Il faudrait corriger \mathcal{L} en fonction de la fréquence pour adapter les courbes aux résultats expérimentaux.

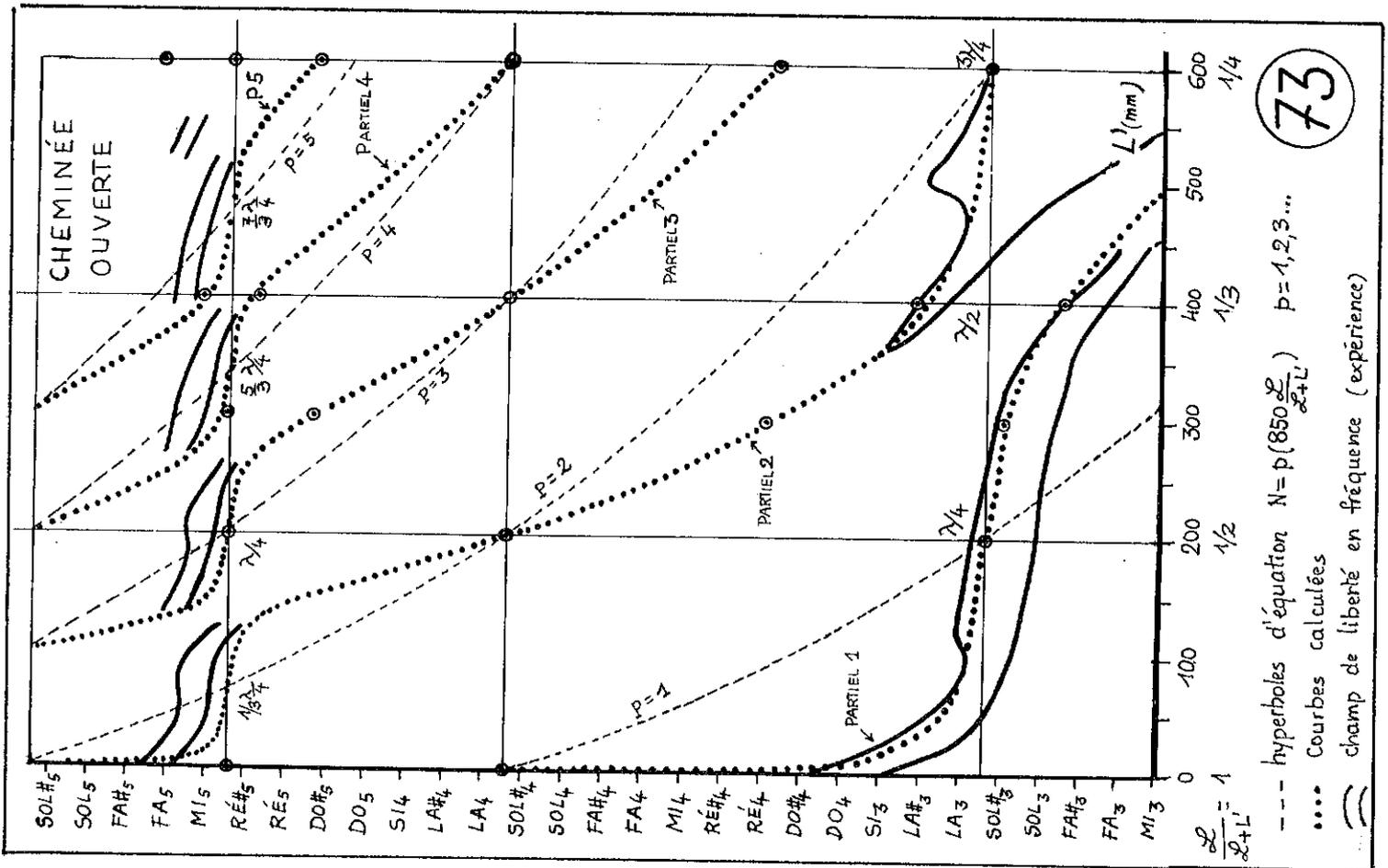
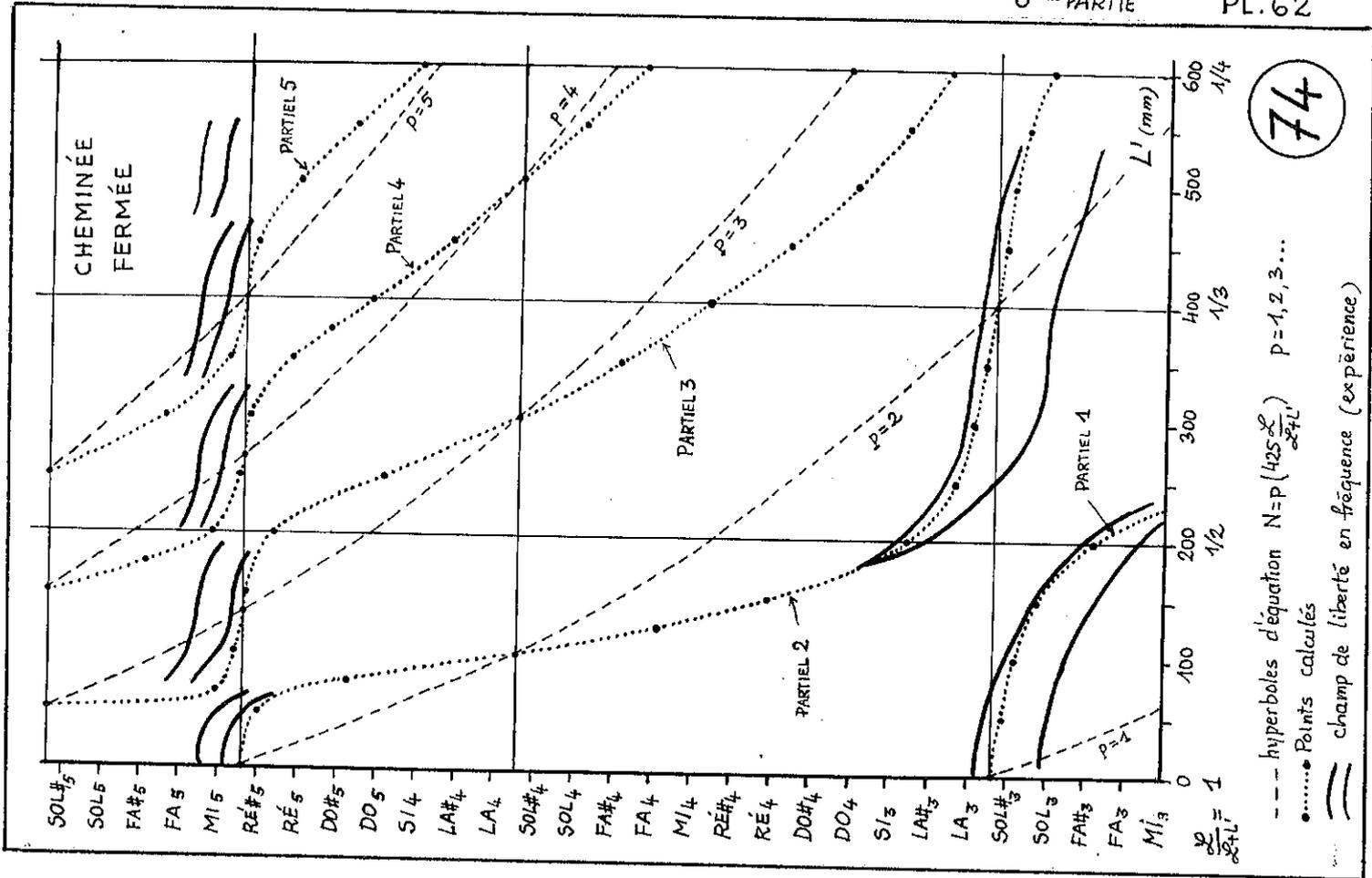
Toujours sur la même figure exprimons en fonction de λ les valeurs de L' . Aux intersections des courbes des partiels avec les horizontales passant par N_0 , fréquence du bourdon AB, et $3 N_0$ fréquence du partiel 2, nous lisons

$$\text{pour le son 1 : } \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4} \text{ etc... } (n-1) \frac{\lambda}{4}$$

$$\text{pour le son 2 : } \frac{1}{3} \frac{\lambda}{4}, \frac{3}{3} \frac{\lambda}{4} \text{ etc... } \frac{(2n-1)}{3} \frac{\lambda}{4}$$

Les sauts, la polyphonie, se produisent pour $L' = n \frac{\lambda}{2}$ pour le son 1, et pour

...../





$$L' = \frac{n}{3} \frac{\lambda}{4} \quad \text{pour le son } 2' .$$

- Tuyau à cheminée fermée.

Nous avons vu que l'on peut connaître les fréquences du tuyau à cheminée fermée à partir des résultats de la cheminée ouverte, en posant $L'_1 = L'_2 + \frac{\lambda}{4}$. Les hyperboles, canevas des courbes théoriques ont pour équation :

$$N = (2p-1) N_0 \frac{L}{L + L'_2} \quad \text{où} \quad N_0 = 425 \text{ Hz}$$

et les courbes proprement dites sont les solutions de l'équation $\delta \operatorname{tg} \theta = \operatorname{cotg} \frac{L'_2 \theta}{L}$.

fig.74

Fig.74 on voit le tracé de ces courbes et les résultats expérimentaux.

fig.72
Pl. 61

Comme dans le cas du tuyau à cheminée ouverte on constate qu'une faible portion seulement des fréquences théoriques est émise par le tuyau, celles qui correspondent aux partiels du bourdon sans cheminée de longueur L . En comparant cette figure avec celle que donne BOUASSE (fig.72) on remarque que les concavités de nos courbes sont inversées. Pour les petites valeurs de L' les fréquences du partiel 1 sont supérieures à celles de la première hyperbole, dans notre figure, mais inférieures à celles de la même hyperbole dans la figure de BOUASSE. Ces différences proviennent du rapport des sections de la cheminée et du tuyau; on a $\frac{s'}{s} > 1$ dans l'expérience de BOUASSE, et $\frac{s'}{s} < 1$ dans la nôtre.

En résumé - Les courbes tracées à partir de la théorie élémentaire permettent de prévoir l'allure de l'évolution en fréquence des partiels d'un bourdon muni d'une cheminée de longueur variable, L' . Elles montrent que les tuyaux à cheminée ne diffèrent pas essentiellement des tuyaux de section uniforme : à longueur égale, les tuyaux à cheminée donnent des sons tantôt plus aigus, tantôt plus graves que les tuyaux de section uniforme.

L'expérimentation avec des tuyaux à bouche offre un intérêt réel, celui de mettre en évidence le rôle de la bouche qui est déterminant dans le choix de certaines fréquences parmi tous les partiels possibles prévus par la théorie. On remarquera que le tuyau proprement dit, celui qui porte la bouche, et qui a généralement le plus gros diamètre dans la pratique, semble jouer un rôle prépondérant de ce point de vue, puisque les portions de courbes émises par le tuyau ne s'écartent que très peu des fréquences propres de ce tuyau. Dans notre expérience le système est très sélectif. Il serait intéressant de connaître le rôle de s'/s sur la largeur des zones de fréquence dans lesquelles fonctionne le tuyau, et celui des dimensions de la bouche.

Nous avons vu aussi l'intérêt des tuyaux à cheminée en musique : par le jeu des proportions de longueur et de diamètre de la cheminée, on peut choisir de rendre les partiels harmoniques ou non du fondamental, donc régler à volonté le contenu harmonique et l'attaque du tuyau. En facture d'orgue la cheminée est généralement plus courte que le tuyau. Dans l'expérience suivante nous avons voulu voir dans quelle mesure on peut rapprocher un tuyau à cheminée d'un tuyau partiellement fermé à chaque extrémité.

§ 3.51 - Tuyau à cheminée et bourdon à calotte percée de même fréquence.

L'expérience que nous allons décrire met bien en évidence l'intérêt du système "tuyau à cheminée" pour le réglage du timbre en facture d'orgue.

...../

fig.75

Prenons un bourdon à cheminée (dimensions sur la figure 75) dont nous enregistrons le son pour quatre longueurs différentes de la cheminée. Changeons la calotte du bourdon et perçons au centre de la nouvelle calotte un petit trou dont nous réglons le diamètre de façon que le tuyau ait la même fréquence que dans le cas de la cheminée la plus longue. Enregistrons le son du tuyau puis agrandissons le trou pour l'amener à la fréquence correspondante à la deuxième longueur de la cheminée et ainsi de suite.

fig.75

Les analyses au sonographe de la figure 75 montrent comparativement le timbre du tuyau à cheminée et celui du bourdon à calotte percée. On constate que le changement de composition harmonique du tuyau en fonction du raccourcissement de la cheminée ou de l'agrandissement du trou est tout à fait comparable, sinon identique dans les deux cas. Tout au plus décèle-t-on un bruit d'écoulement plus marqué et une certaine instabilité du son dans le cas du tuyau à calotte percée. Il se produit vraisemblablement au niveau du trou des phénomènes circulatoires qui gênent l'établissement de l'onde stationnaire dans le tuyau. Tous les facteurs d'orgue savent qu'un bourdon mal bouché, (fuite dans la calotte), parle mal et a un " vilain son ".

Cette expérience permet aussi de reconsidérer le fonctionnement du tuyau à cheminée. Dans le cas où la longueur de la cheminée est inférieure à celle du tuyau nous pouvons assimiler le tuyau à cheminée à un tuyau partiellement fermé aux 2 bouts. Nous avons vu, au § 3.03 que les modifications de fréquence des partiels étaient très importantes pour un petit changement de diamètre du trou "d", lorsque le rapport d/D est voisin de 0. Dans cette expérience, nous passons de $d/D = 1,5/33 = 0,046$ à $3,5/33 = 0,10$. Nous sommes dans la portion de forte pente de la courbe d'abaissement du partiel 1.

Finalement, du point de vue pratique, l'intérêt de la cheminée est évident. On obtient la même modification de timbre et de hauteur en raccourcissant la cheminée de 25 mm ou en agrandissant le diamètre du trou de 1 mm. Avec la cheminée il est possible de pratiquer sans trop de peine un réglage fin et précis du tuyau et le son de ce dernier est plus stable.

§ 3.52 - Tuyau à cheminée de fréquence donnée. L' et D' variables

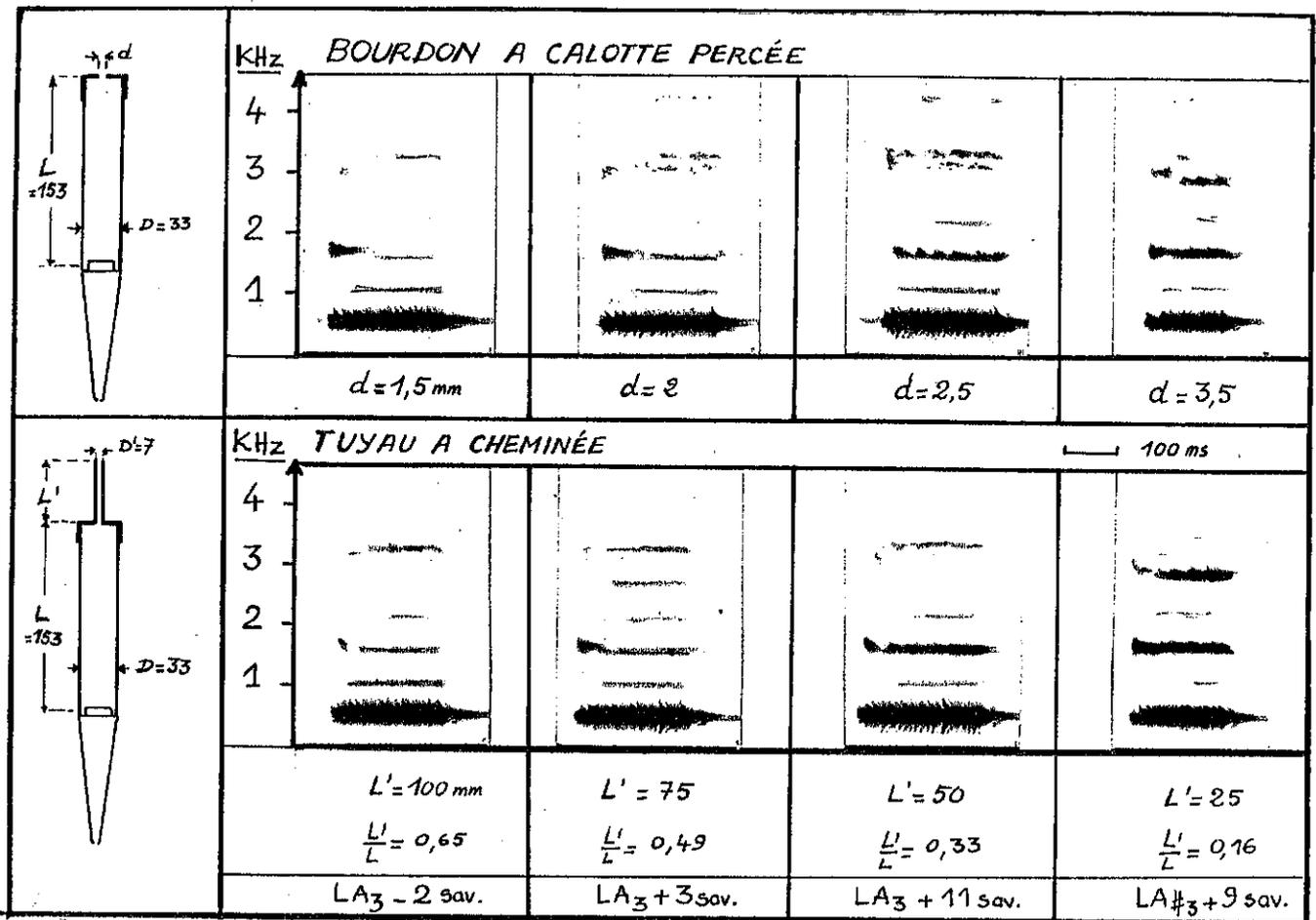
fig.76

Prenons un bourdon et adaptons successivement à la calotte des cheminées de différents diamètres. Nous ajusterons les longueurs de ces cheminées de façon que le tuyau à cheminée ait dans chacun des cas la même fréquence fondamentale (Dimensions sur la figure 76. Puis nous enregistrons le son du tuyau posé sur un sommier d'orgue et joué à pression constante.

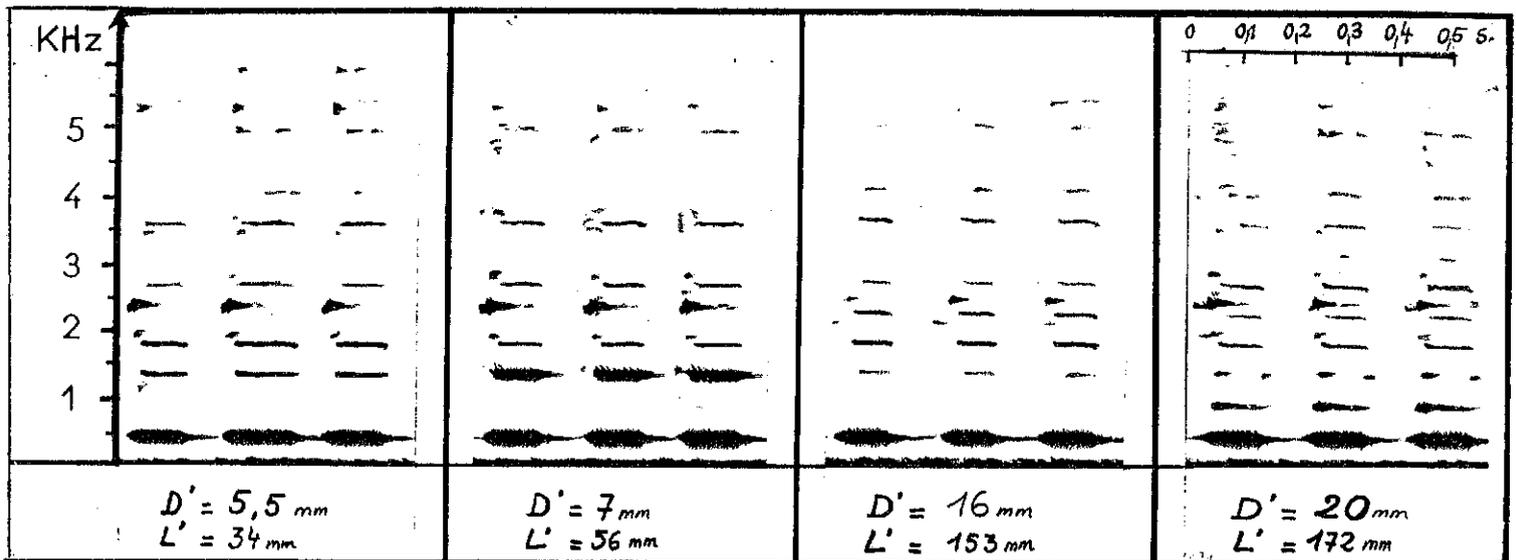
L'analyse du timbre du tuyau muni successivement de 4 cheminées différentes montre les résultats suivants :

- Le son de bouche est toujours de même fréquence mais d'intensité variable.
- Dans tous les cas le fondamental est intense, ce qui est caractéristique d'un tuyau à bouche de grosse taille.
- Les autres harmoniques diffèrent très sensiblement. On n'obtient le timbre caractéristique d'un tuyau à cheminée, harmonique 1 et 3 aussi intenses, que pour $D' = 7$. Quand la cheminée est plus courte, l'harmonique 3 n'est pas plus intense que le 4. Pour une cheminée plus longue et plus grosse, $D' = 16$ l'harmonique 3 s'affaiblit au point de disparaître. Enfin, dans le dernier cas, $D' = 20$, la cheminée est plus longue que le tuyau, et le timbre est pratiquement celui d'un tuyau ouvert, puisque l'harmonique 2 est présent, et même plus intense que l'harmonique 3.

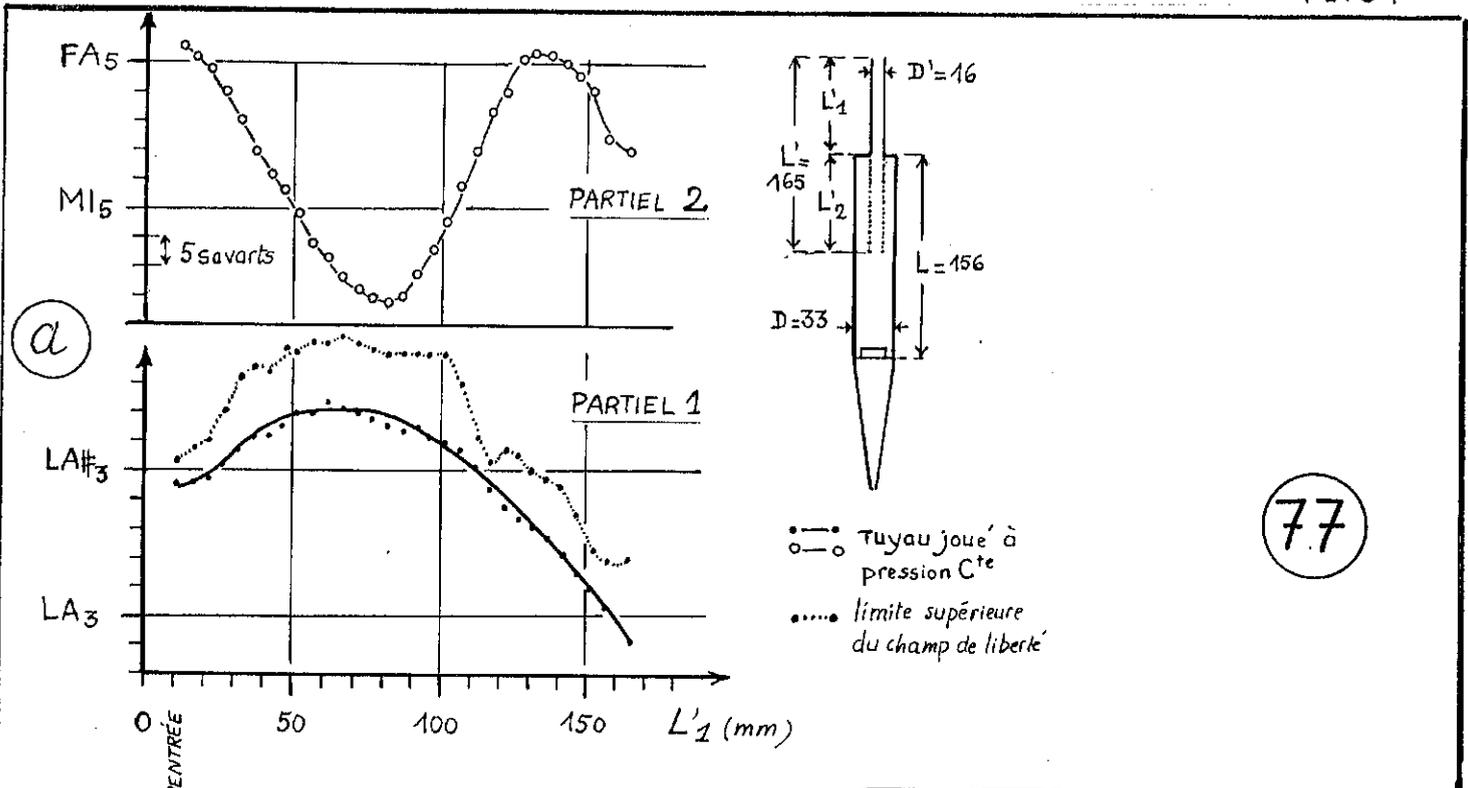
Cette expérience sommaire confirme l'expérience des facteurs d'orgue. Selon



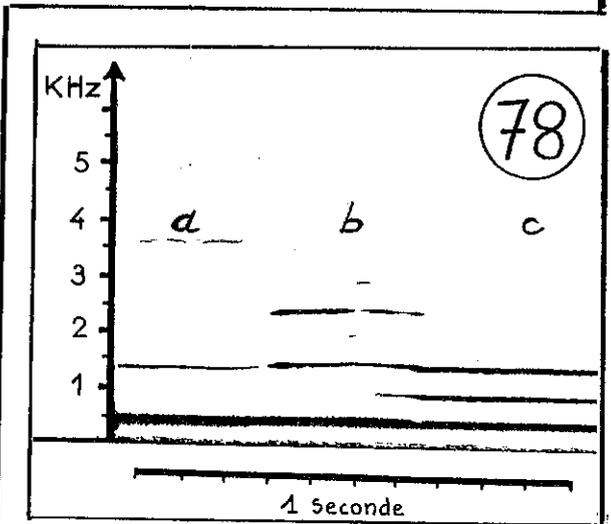
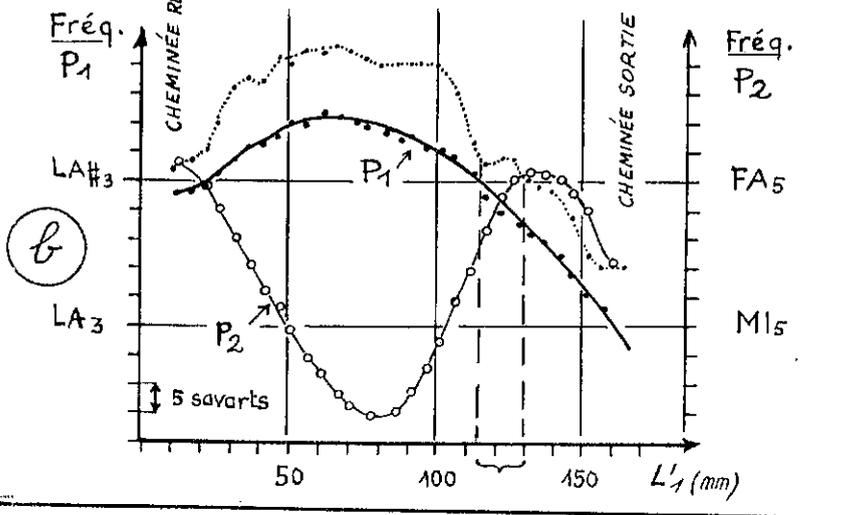
75



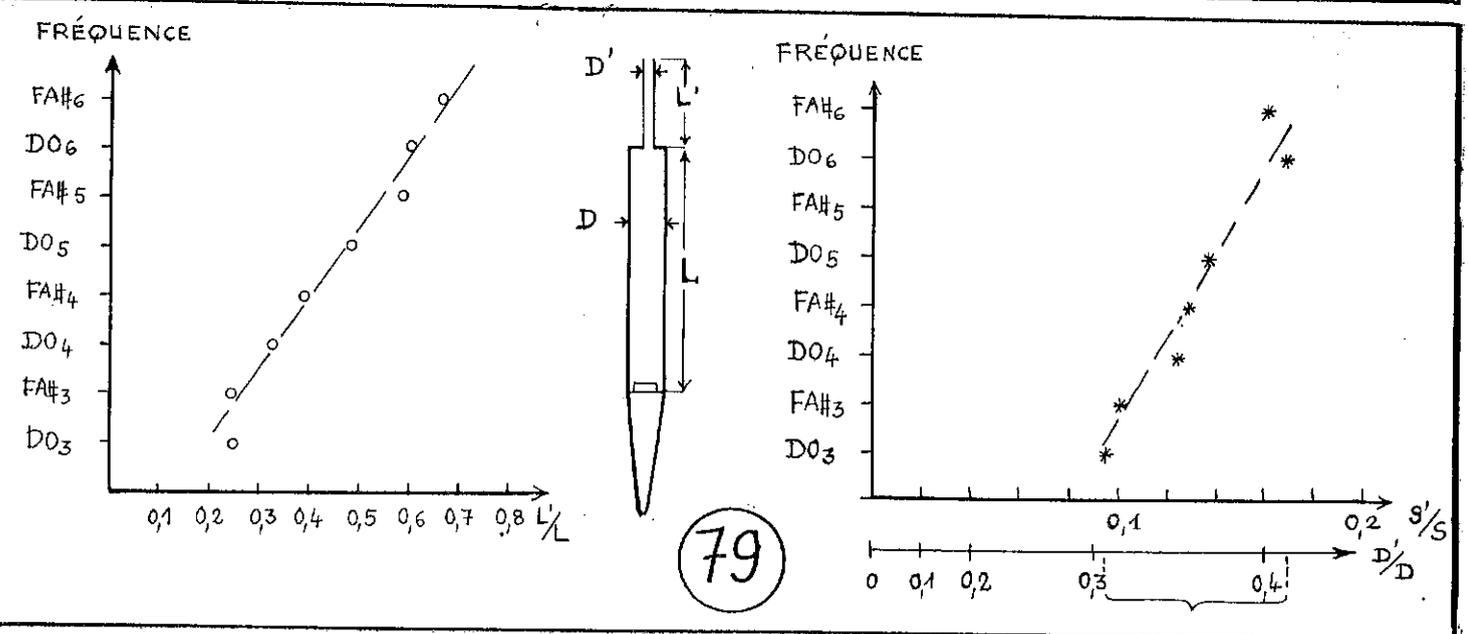
76



77



78



Dom BEDOS (Bib. § 153) " plus la cheminée est grosse et haute, plus l'harmonie approche de celle d'un tuyau ouvert; et plus elle est courte et menue, plus l'harmonie approche de celle d'un tuyau bouché ".

On pourra nous reprocher de comparer le son du tuyau muni de cheminées différentes, à la même pression et sans réharmoniser la bouche. Il est bien évident qu'il aurait fallu, à chaque nouvelle cheminée modifier un peu la quantité d'air alimentant le tuyau et retoucher la bouche pour que le tuyau parle au mieux. Mais pour permettre une comparaison plus facile nous avons jugé préférable de ne rien modifier dans l'excitation. De toutes façons les rapports d'intensité des harmoniques, qui nous intéressent ici, seraient les mêmes car ils dépendent essentiellement de l'harmonicité des partiels, donc des proportions relatives de la cheminée et du tuyau.

§ 3.53 - Cheminée de longueur donnée coulissant dans la calotte du bourdon

L'idée de cette expérience nous est venue en apprenant que les facteurs d'orgue plaçaient quelquefois la cheminée à l'intérieur du tuyau, en la soudant à la face inférieure de la calotte. Il nous a semblé intéressant d'explorer les positions intermédiaires en réalisant un dispositif permettant de faire passer progressivement la cheminée de l'extérieur du tuyau vers l'intérieur (fig.77).

Nous avons tout d'abord relevé, pour une pression constante, la variation en fréquence des partiels 1 et 2 et porté les résultats sur un graphique.

Lorsqu'on enfonce la cheminée dans le tuyau, (L_1 diminue) la fréquence du fondamental commence par croître, passe par un maximum puis décroît. On pourrait penser que la baisse de fréquence provient de l'obstruction de la bouche par la cheminée, qui, dans notre expérience est plus longue que le tuyau. Mais si on observe la variation en fréquence du partiel 2 on remarque qu'elle est croissante pour les petites valeurs de L_1 . L'aspect périodique de cette variation en fréquence des partiels 1 et 2 rappelle les courbes obtenues en déplaçant un diaphragme dans l'axe du tuyau (§ 3.35). Ce qui laisse penser que la cheminée que l'on enfonce dans le tuyau agirait comme un rétrécissement localisé.

Les phénomènes sont en tous cas très compliqués, et faute d'expériences complémentaires nous devons nous limiter à ces constatations.

fig.78 Du point de vue du timbre la variation est assez grande (fig.78). En a), cheminée sortie, le spectre est pauvre en harmoniques. En b) on passe par une position remarquable pour laquelle les partiels 2 et 3 sont proches des harmoniques 3 et 5, d'où un renforcement de ceux-ci. En se reportant à la fig. 77b on voit qu'il s'agit de la zone pour laquelle L_1 est compris entre 110 et 130 mm.

fig.77b En c), la cheminée est presque complètement rentrée dans le tuyau. Le timbre est semblable à celui d'un tuyau ouvert; outre les harmoniques 1 et 3, l'harmonique 2 est intense. Pourtant lorsqu'on force le vent, il n'est pas possible de faire octavier le tuyau...

En conclusion, cette expérience demanderait à être reprise et complétée. Elle montre tout de même qu'un tel dispositif de cheminée réglable, s'il n'est pas utilisé pour des raisons évidentes d'étanchéité, difficile à réaliser en pratique, pourrait présenter un intérêt, car il permet une grande variation de timbre pour une variation de fréquence relativement faible.

§ 3.54 - Le jeu de flûte à cheminée dans l'orgue. Etude spectrographique

Dans la facture d'orgue classique, la longueur de la cheminée dépasse rarement celle du tuyau. Dom BEDOS (P.42) précise que " (la cheminée) doit être d'autant plus haute qu'on la fait grosse, et plus elle est menue, plus elle doit être courte. Les plus grosses ont la moitié du diamètre du corps du tuyau; elles sont alors aussi longues que le corps. Certains facteurs leur donnent seulement le quart ou le huitième du diamètre du corps; elles sont alors plus courtes à proportion ".

La longueur de la cheminée est définie par rapport au diamètre du tuyau principal. Comme la taille d'un tuyau donné varie selon la tessiture, le rapport L'/L de la longueur de la cheminée à celle du tuyau change aussi selon la tessiture. Le rapport des diamètres D'/D se modifie également.

Voici le relevé des dimensions du jeu de tuyau à cheminée (flûte 4') d'un orgue de salon (fig.79). La première octave du jeu est en bourdons.

Du plus grand tuyau à cheminée (DQ3) au plus petit mesuré (FA #6)

L'/L passe de 0,25 à 0,66 (soit $1/4$ à $2/3$)

D'/D passe de 0,31 à 0,41

On voit donc que le facteur a modifié les proportions de façon que les cheminées soient plus longues et plus grosses sur le dessus.

- Analyse spectrographique de quelques jeux de tuyaux à cheminée.

Il est intéressant de comparer le jeu de tuyau à cheminée avec le bourdon. Les analyses des fig. 80, 81, 82 et 83, ne montrent chaque fois que quelques fragments des jeux : gammes ascendantes ou descendantes mais permettent déjà de dégager les caractéristiques principales du timbre.

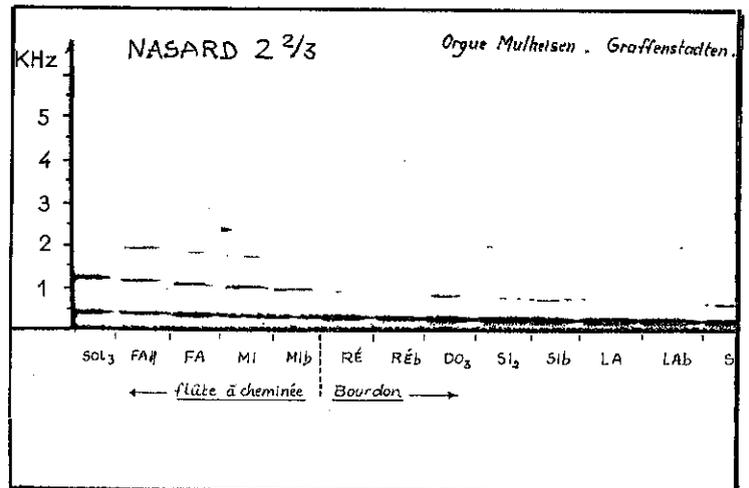
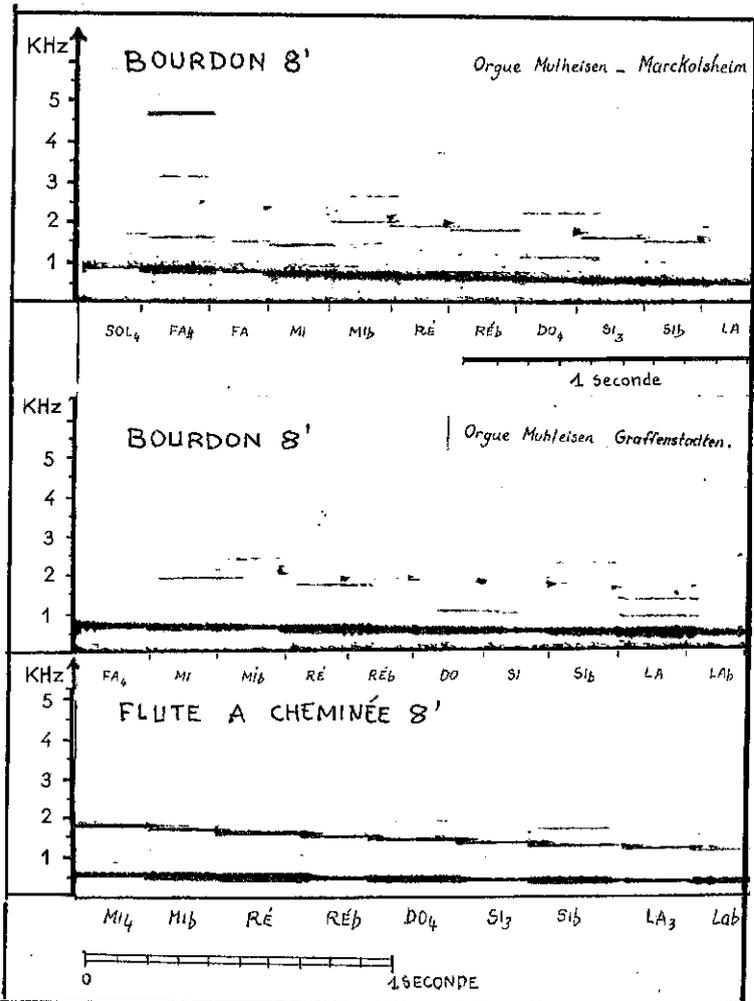
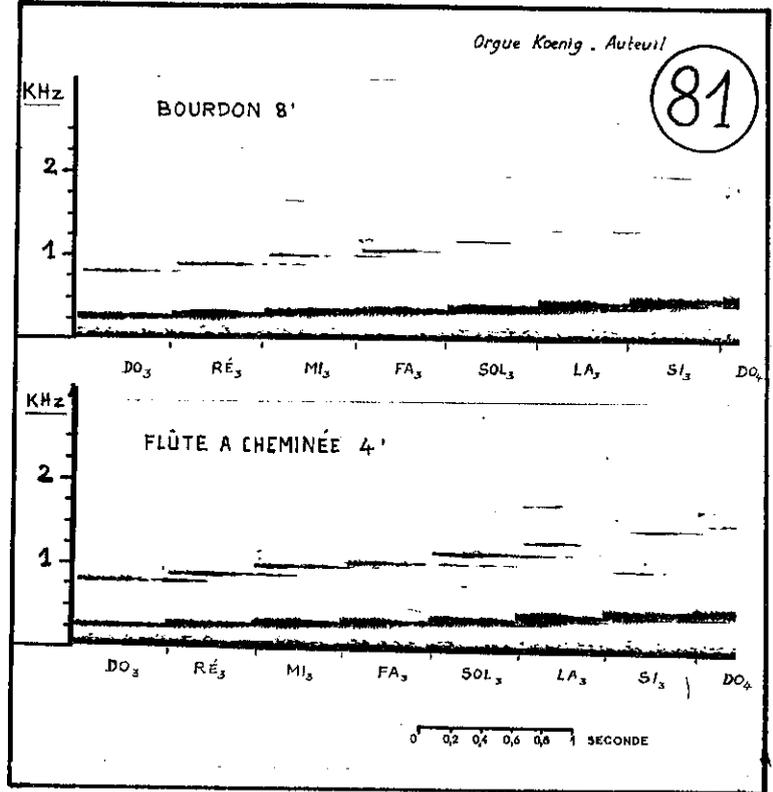
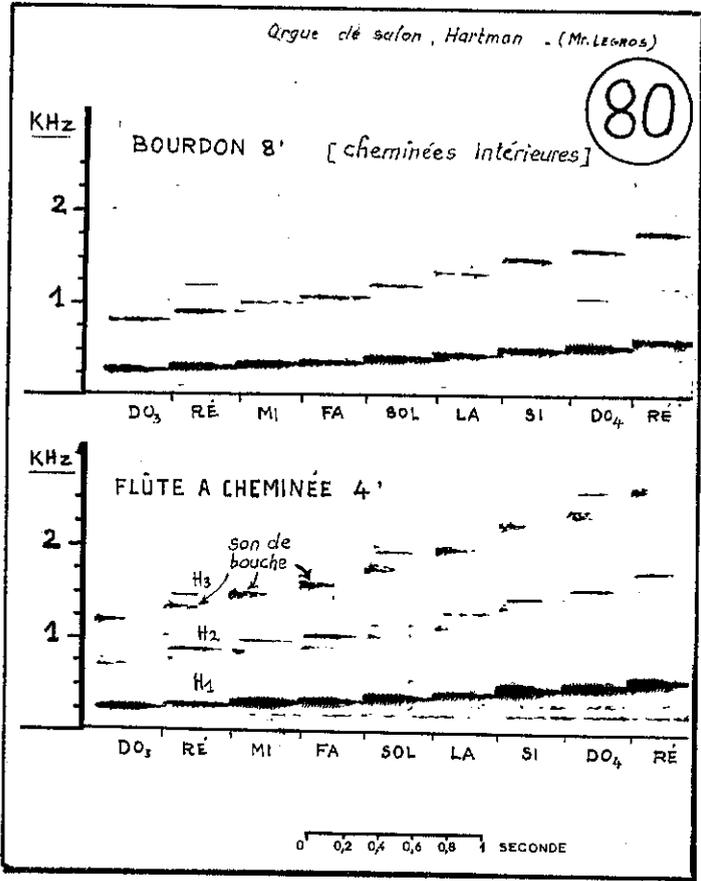
fig.80 Fig.80, le bourdon 8' est aussi à cheminée; il donne très nettement des harmoniques 1 et 3. Le jeu de flûte à cheminée proprement dit est traité différemment. Il est plus riche en harmoniques et surtout le son de bouche, très intense, accorde à l'attaque un partiel plus bas que l'harmonique 5 et beaucoup plus intense que celui-ci. Rappelons qu'il s'agit d'un orgue de salon.

fig.81 Fig.81, le bourdon 8' et la flûte à cheminée ont des timbres très voisins. L'harmonique 3 est plus accentué et plus régulier dans le jeu de flûte à cheminée.

fig.82 Fig.82, on voit l'analyse de 2 jeux de bourdon de 2 orgues différents, du même facteur. L'analogie est évidente : fondamental prédominant, son de bouche de courte durée, mais très net, accrochant le partiel 3, plus aigu que l'harmonique correspondant. Par oppositon, le jeu de flûte à cheminée offre avec régularité les harmoniques 1 et 3 et le son de bouche est éliminé.

fig.83 En bref, le timbre du jeu de flûte à cheminée est généralement plus riche en harmoniques (particulièrement les harmoniques 3 et 5) que celui du bourdon correspondant, mais on voit, par ces quelques exemples combien le timbre peut varier selon les proportions de la cheminée et surtout selon l'harmonisation des tuyaux. La fig.83 montre le passage des tuyaux de flûte à cheminée aux tuyaux de bourdon, dans un même jeu (Nasard). La transition a été habilement réalisée à l'harmonisation. Tout au plus on décèle le bourdon à l'intensité plus grande du fondamental.

Cet exemple montre une fois de plus l'importance des paramètres liés à la bouche, dans le timbre des sons.



§ 3.55 - Conclusions

Les tuyaux à cheminée sont un exemple intéressant de discontinuité dans la section droite des tuyaux à bouche.

Ils permettent d'obtenir des timbres variés selon les dimensions respectives du tuyau et de la cheminée; la souplesse de réglage qu'ils offrent est largement exploitée dans la facture d'orgue.

Le phénomène de diphonie (ou polyphonie) des tuyaux à cheminée, que BOUASSE cite en exemple à divers endroits de ses ouvrages n'est pas du tout systématique. On ne l'obtient que dans certaines conditions particulières de l'excitation et pour des proportions données de la cheminée et du tuyau. Lors de l'utilisation musicale courante les tuyaux à cheminée émettent des sons harmoniques.

Enfin nous avons montré l'intérêt de l'expérimentation avec des tuyaux à bouche, afin de préciser, dans l'ensemble des partiels prévus par la théorie, ceux qui seront réellement produits par le tuyau. De ce point de vue nous avons constaté le rôle prépondérant du bourdon proprement dit, dans le cas où le diamètre de la cheminée est plus petit que celui du bourdon.

Chap. V - TUYAUX DE SECTION VARIABLE1) TUYAUX CONIQUES ET TRONCONIQUES§ 3.56 - Généralités

La plupart des tuyaux à embouchure de flûte percés de trous latéraux sont de section conique ou cylindro-conique, le gros bout étant situé du côté de l'embouchure.

Après un très bref rappel des propriétés de ces tuyaux, nous relaterons quelques expériences systématiques portant sur les tuyaux à bouche tronconiques et cylindro-coniques puis nous tenterons de dégager les caractéristiques des différents types de flûtes en usage, en fonction, de l'adaptation réciproque de l'embouchure, de la perce du tuyau et de la position des trous latéraux.

§ 3.57 - Cône complet

On sait qu'un tuyau conique ouvert à sa base possède théoriquement la même série de partiels qu'un tuyau cylindrique ouvert aux 2 bouts et de même longueur. Pour les instruments à embouchure de flûte le cône n'est jamais complet, il s'agit en fait de tuyaux tronconiques.

§ 3.58 - Tuyaux tronconiques ouverts aux 2 bouts ou fermés à 1 bout

En vertu de la règle de l'équidistance des ventres, on démontre aisément que la série des partiels d'un tronc de cône ouvert aux 2 bouts est la même que celle d'un cylindre de même longueur ouvert aux 2 bouts. Dans la réalité, on doit tenir compte d'une correction de longueur qui dépend des diamètres des bases d et D et croît avec ceux-ci. MAHILLON, cité par BOUASSE ((2) P. 365) donne la formule suivante pour la

$$\text{fréquence du fondamental : } N = \frac{V}{2 [L + 0,375 (D+d)]}$$

Si l'on ferme le tronc de cône à l'une de ses bases, les partiels deviennent inharmoniques.

La fréquence fondamentale d'un tronc de cône fermé au petit bout est plus élevée que celle du bourdon cylindrique de même longueur. Inversement, le tronc de cône fermé au gros bout a une fréquence fondamentale plus basse que celle du bourdon cylindrique de même longueur. WHEATSTONE, ZAMMINER, MAHILLON ont fait plusieurs séries d'expériences pour déterminer les partiels de troncs de cône fermés à un bout, en fonction du rapport de diamètre des bases ($\nu = \frac{D}{d}$) cf. BOUASSE, ((2) P.370 à 375). Mais les tuyaux à embouchure de flûte ne sont que partiellement fermés du côté de l'embouchure; ils forment une classe intermédiaire entre les troncs de cône ouverts aux 2 bouts et ceux fermés à 1 bout.

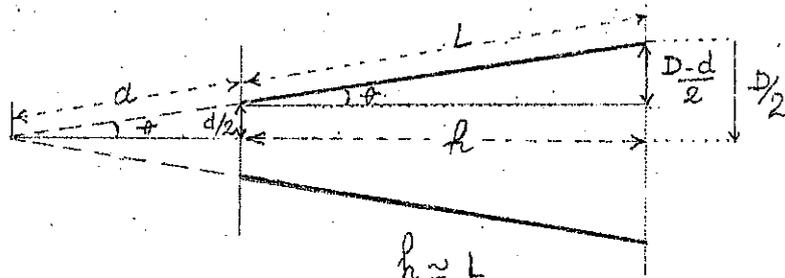
L'expérience qui suit va nous renseigner sur les modifications des rapports de fréquence des partiels en fonction de la fermeture partielle à l'extrémité.

2) TRONCS DE CONE PARTIELLEMENT FERMES A UNE EXTREMITE

NOTE -- Dans la suite du chapitre nous utiliserons souvent des tuyaux tronconiques dont nous donnons les caractéristiques dans le tableau I. On voudra bien s'y reporter au besoin.

TABLEAU I

(mesures en mm)



		D/d	d/D	$\frac{D-d}{2}$	$\sin \varphi$	a	φ	penne (%)	L/a
A	D=20 d=8,5 L = 300	2,35	0,425	5,75	0,0191	222,22	$\approx 1^\circ$	1,91	1,35
B	D=20 d=13 L = 300	1,54	0,65	3,5	0,0116	555,5	$30' < \varphi < 1'$	1,16	0,54
C	Tuyau cylindrique D=20 L = 300	1	1	/	/	/	/	/	/
D	d=20 D=26,4 L = 300	1,32	0,758	3,2	0,0106	937	$30' < \varphi < 1'$	1,06	0,320
E	d=20 D=51 L = 300	2,55	0,392	15,5	0,0516	193,6	$\varphi \approx 3^\circ$	5,16	1,55
F	D=20 d=17,3 L = 150	1,15	0,87	1,35	0,009	961	$30' < \varphi < 1'$ (id. cône B)	0,9	0,156
G	d=20 D=35,5 L = 150	1,77	0,56	7,7	0,051	193,6	$\varphi \approx 3^\circ$ (id. cône E)	5,16	0,775

§ 3.59 - Variation de la fermeture partielle : conséquences sur les fréquences des partiels et leur justesse relative - (résonances)

Prenons les deux troncs de cônes B et E et un cylindre C de référence dont le diamètre est 20 mm. Ces trois tuyaux ont la même longueur et une extrémité de même diamètre (20 mm). De ce côté, mastiquons à chaque tuyau une série de plaques rigides ($\xi = 2$ mm) percées d'un trou central de diamètre (d) tel que $0 < d < 20$ mm.

Relevons par la méthode des résonances les fréquences de divers partiels en fonction du diamètre du trou de la plaque, et portons sur un graphique l'évolution en fréquence du partiel 1 en fonction de (d). Nous allons comparer les trois types de tuyaux (fig.84a). Pour $d/D = 1$ les trois tuyaux n'ont pas exactement la même fréquence fondamentale. Le cône E dont la grande base a 51 mm de diamètre admet une correction de longueur plus grande que le cylindre; sa fréquence est plus basse d'environ 4 savarts. Le cône B, convergent, a au contraire une fréquence plus élevée que le cylindre puisque le diamètre de sa petite base n'a que 13 mm.

Diminuons maintenant le diamètre du trou d . Les fréquences des trois tuyaux décroissent de façon assez semblable tant que $d/D > 0,6$. Lorsque d diminue encore, la fréquence du cône divergent est beaucoup moins abaissée que celles du cylindre et du tronc de cône convergent. Pour les très petites valeurs de d le tronc de cône convergent s'écarte du cylindre en étant beaucoup plus abaissé.

Il s'ensuit que les courbes se croisent et que pour une certaine valeur de d (ici 10 mm) les trois tuyaux ont à peu près la même fréquence fondamentale.

Examinons maintenant l'intervalle existant entre la fréquence du tuyau ouvert aux deux bouts (N_o) et celle du tuyau fermé à un bout (N_b).

fig.84a

On lit, fig. 84a

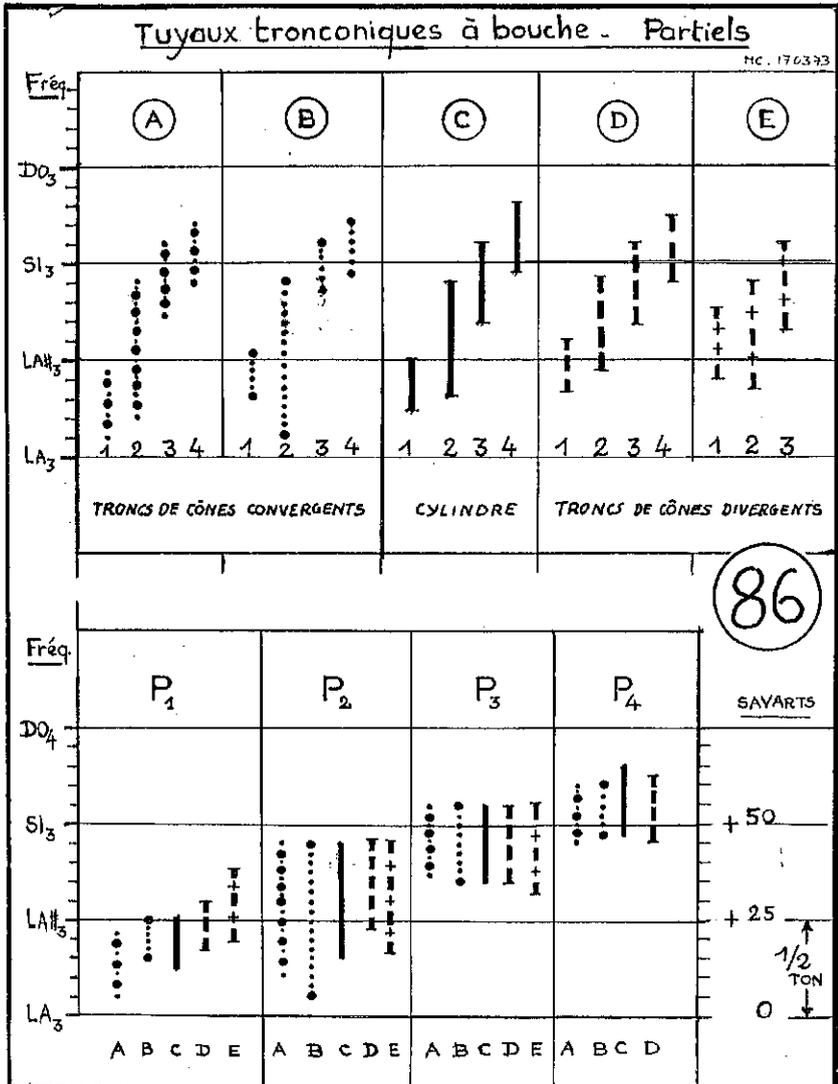
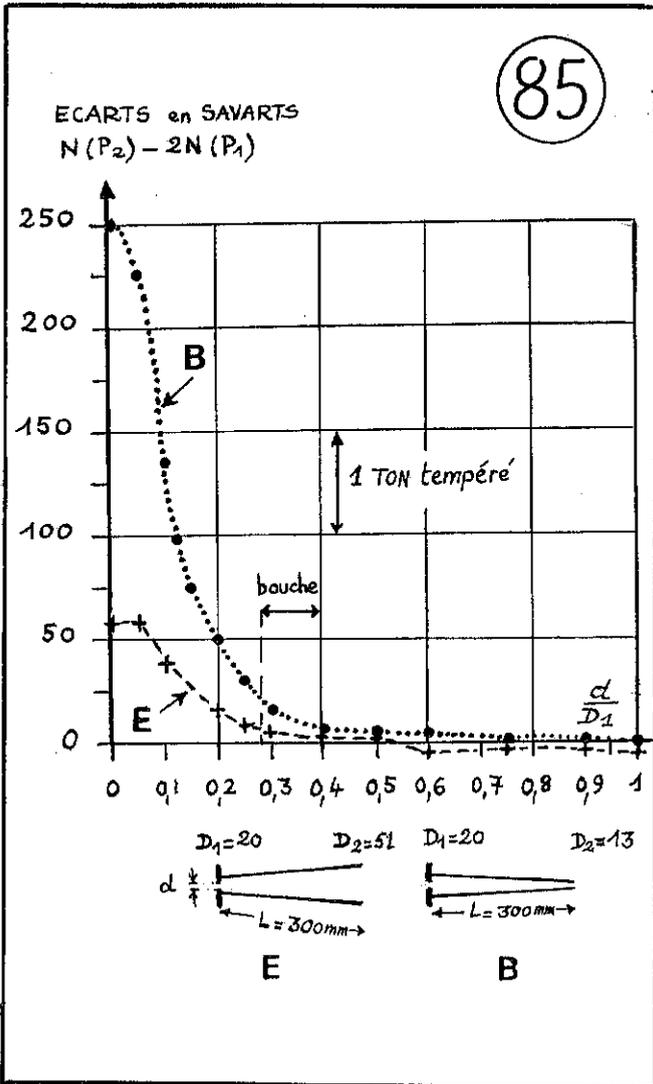
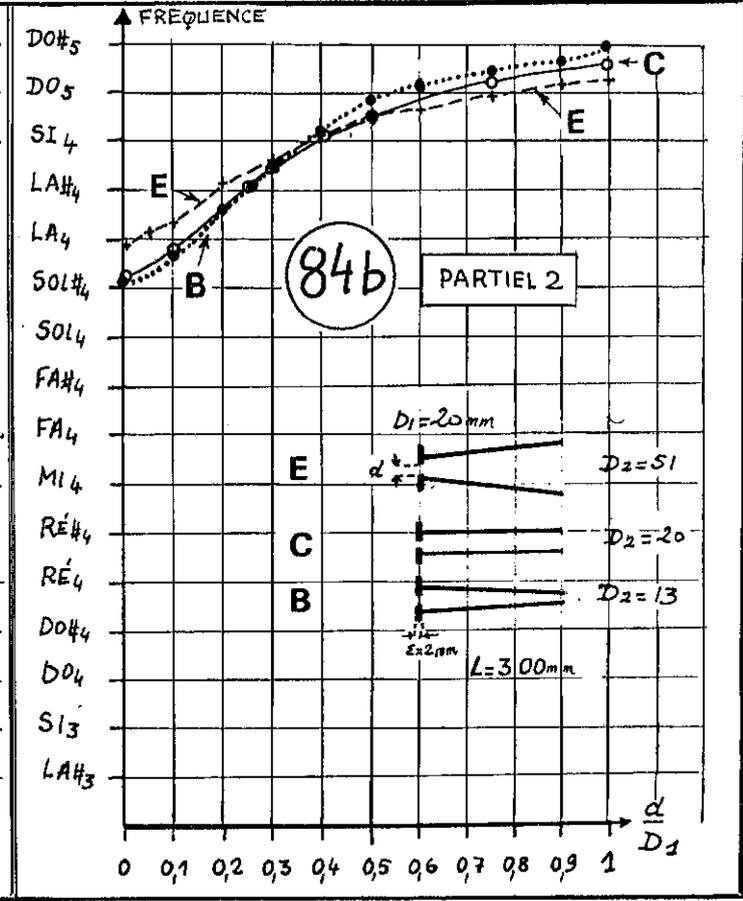
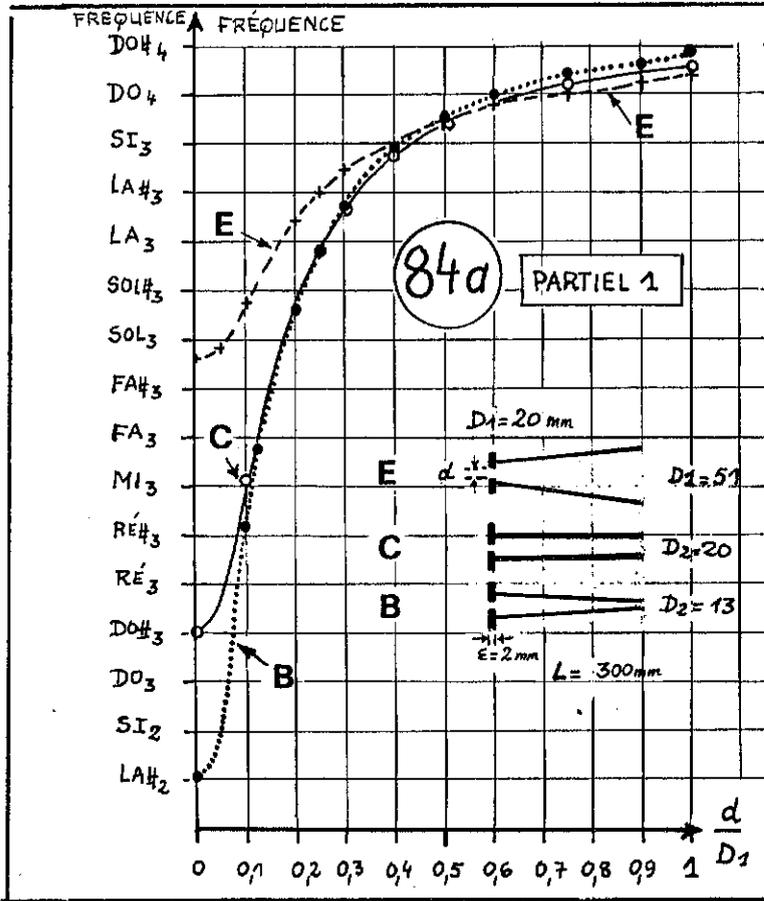
	N_o	N_b	N_o / N_b	Intervalle musical
Tronc de cône E	DO \sharp_4 -15 s.=535 Hz	SOL $_3$ -10s. = 383 Hz	1,4	4te aug.
Tuyau cyl. C	DO \sharp_4 -10 s.=541 Hz	DO \sharp_3 0s. = 277 Hz	1,95	< 8ve
Tronc de cône B	DO \sharp_4 - 2 s.=552 Hz	LA \sharp_2 + 2s.= 234 Hz	2,35	8ve + 3m

On sait que le rapport N_o/N_b théoriquement égal à 2 est en réalité un peu inférieur à ce nombre en raison des corrections de longueur différentes pour le tuyau ouvert aux 2 bouts et fermé à un bout. C'est bien le cas pour le tuyau C, cylindrique ($N_o/N_b = 1,95$). Les deux troncs de cône s'écartent considérablement de cette valeur comme on peut le constater.

fig. 84b

Si l'on examine maintenant les courbes du partiel 2 (fig. 84b) on remarque que les différences entre les tuyaux sont beaucoup moins accentuées. Comme précédemment l'intervalle entre la fréquence du tuyau ouvert aux deux bouts ou fermé à un bout est maximum pour le tronc de cône convergent, et minimum pour le tronc de cône divergent; le cylindre se situant entre les deux.

Les courbes se croisent aussi, pour d/D compris entre 0,3 et 0,4.



- Justesse des partiels 1 et 2

fig.85

Prenant la fréquence du partiel 1 comme référence nous exprimons (en ordonnée) l'écart entre la fréquence du partiel 2 et celle de l'harmonique 2 du partiel 1 (fig.85). Pour ne pas charger la figure nous n'avons pas représenté la courbe du cylindre C très voisine de celle du tronc de cône B pour $d/D > 0,1$. En comparant les tuyaux B et E on note que le partiel 2 du cône convergent est toujours supérieur ou égal à l'octave alors que celui du cône divergent peut être inférieur à l'octave pour les grandes valeurs de (d).

Si nous assimilons le trou (d) à la surface d'une bouche de flûte à bec nous nous trouvons dans la zone indiquée sur la figure : $0,28 < d < 0,4$. Nous pouvons en conclure que le partiel 2 sera plus haut que l'octave du fondamental; sa fausseté étant plus grande pour le cône convergent.

§ 3.60 - Tuyaux tronconiques à bouche - Expérience

Prenons maintenant une embouchure réelle de flûte à bec (4 x 6 mm) que nous raccordons successivement à l'extrémité de diamètre commun de nos cinq tuyaux A,B,C,D et E (cf. tabl. I). Nous disposons de 2 cônes convergents, 2 cônes divergents et un cylindre.

a) - Champ de liberté en fréquence des partiels.

fig.86a

fig.86b

En jouant les tuyaux avec la bouche on relève le champ de liberté des quatre premiers partiels, et l'on porte les résultats sur 2 graphiques, d'une part les partiels d'un même tuyau représentés de façon que l'on puisse apprécier leur écart par rapport aux harmoniques du fondamental (fig. 86a) et d'autre part les partiels de même rang des différents tuyaux regroupés côte à côte (fig.86b). L'ordonnée, en notes de musique, se rapporte seulement au partiel 1.

fig.84

En nous reportant à la figure 84 nous constatons que les fréquences des partiels 1 et 2 des tuyaux B,C,E sont approximativement celles d'un tuyau partiellement fermé tel que $d/D_1 = 0,3$ ce qui correspond à la surface de la bouche utilisée ici.

De l'examen de la figure 86 nous pouvons tirer les constatations suivantes :

- pour tous les types de tuyaux les partiels sont plus hauts que les harmoniques du partiel 1.
- les écarts sont plus notables pour les troncs de cônes convergents.
- Si l'on prend le tuyau cylindrique comme référence on peut dire que le partiel 1 est abaissé dans le cas des troncs de cônes convergents (A et B) et élevé dans celui des troncs de cônes divergents (D et E).

§ 3.61 - Timbre des tuyaux tronconiques à bouche

Nous avons joué successivement les 5 tuyaux, toujours avec la même bouche en articulant des sons détachés de façon à répéter 3 fois de suite le partiel 1 puis le partiel 2. Le son, enregistré à 50 cm de la bouche et face à celle-ci, est ensuite analysé au sonographe.

fig.87

Les résultats de la figure 87 confirment l'opinion courante :

...../

- les troncs de cône convergents ont un timbre sourd, ce que l'on voit clairement sur le partiel 1 : peu d'harmoniques, harmonique 2 faible, voire inexistant pour le tuyau A.
- les troncs de cônes divergents ont un timbre clair, éclatant : 4 à 5 harmoniques d'intensité notable, l'harmonique 2 étant bien stable. Pour le partiel 2 on notera l'intensité croissante du premier harmonique lorsqu'on passe du tronc de cône le plus fermé au tronc de cône le plus ouvert.

fig.88 Du point de vue de la durée et de la composition des transitoires d'attaque on constate d'importantes différences selon les tuyaux. Pour mieux lire les phénomènes nous donnons, fig.88 une représentation agrandie des attaques du partiel 1. Les tuyaux C et D ont l'attaque la plus courte (env. 20 ms) puis vient le tuyau B (env. 30 ms). L'attaque des tuyaux D et E atteint 45 à 50 ms.

Le tuyau attaque tantôt sur le son de bouche qui accroche le partiel 2 (C et E) tantôt sur le fondamental (A). Pour B et D, le décalage est faible et l'analyse ne permet pas de décider.

La bouche étant la même pour les 5 tuyaux, les différences constatées proviennent uniquement des rapports de fréquence des partiels. Le relevé des courbes fréquence/pression permet de mieux comprendre les phénomènes.

fig.89

Fig.89 nous avons mesuré la fréquence pour quelques valeurs fixes de la pression en alimentant les tuyaux avec de l'azote comprimé. Les fréquences des partiels 2 sont ramenées à l'octave inférieure pour les comparer plus aisément au partiel 1. Dans tous les cas la bouche saute au partiel 2 pour une pression comprise entre 7 et 8 mm d'eau. Lorsque les courbes des partiels 1 et 2 se raccordent à peu près continument, comme c'est le cas pour les tuyaux B, C, D, l'attaque du fondamental du tuyau est assez bonne comme nous l'avons vu, le meilleur résultat étant obtenu pour le tuyau D. Les tuyaux A et D dont les courbes ne se raccordent pas sont difficiles à attaquer.

La rapidité et la précision de l'attaque dépendent avant tout des propriétés de la bouche mais on voit que les rapports de justesse des partiels interviennent aussi. Une bouche donnée peut être mieux adaptée à un tuyau cylindrique ou au contraire à un tuyau cylindro-conique; nous en verrons un exemple plus loin.

3) TUYAUX CYLINDRO-CONIQUES

§ 3.62 - Généralités

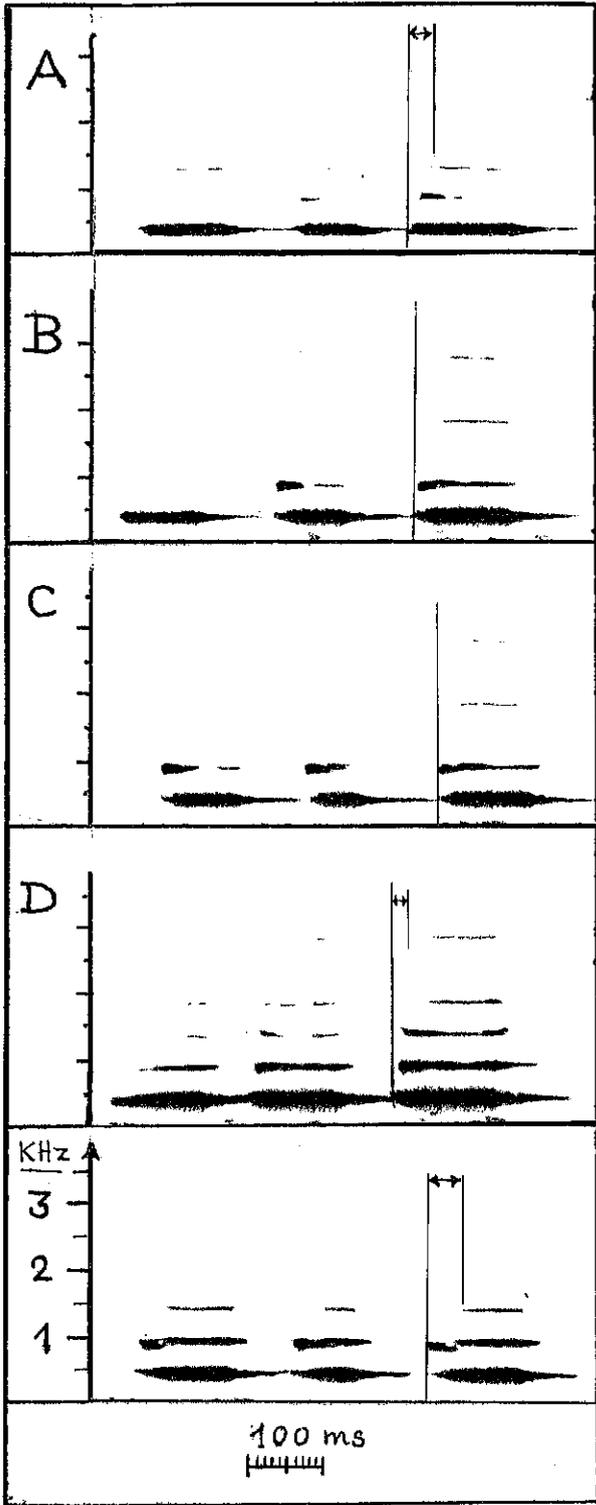
La flûte à bec et la flûte traversière baroques, de même que bon nombre d'instruments dits " coniques " sont en fait cylindriques sur une partie de leur longueur (voir relevés de perce fig.107, planche 75). Nous allons donc examiner maintenant, à l'aide de quelques exemples, comment se comportent les partiels de tels tubes en fonction du rapport de longueur des parties cylindrique et conique, et selon que l'embouchure se trouve au bout conique ou au bout cylindrique.

Voyons d'abord ce que dit la théorie.

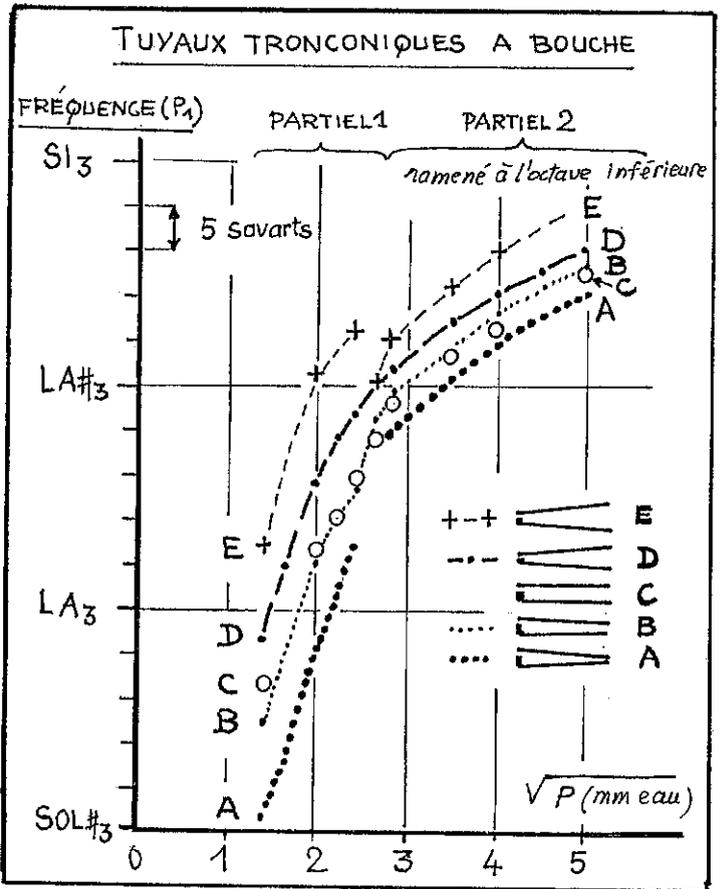
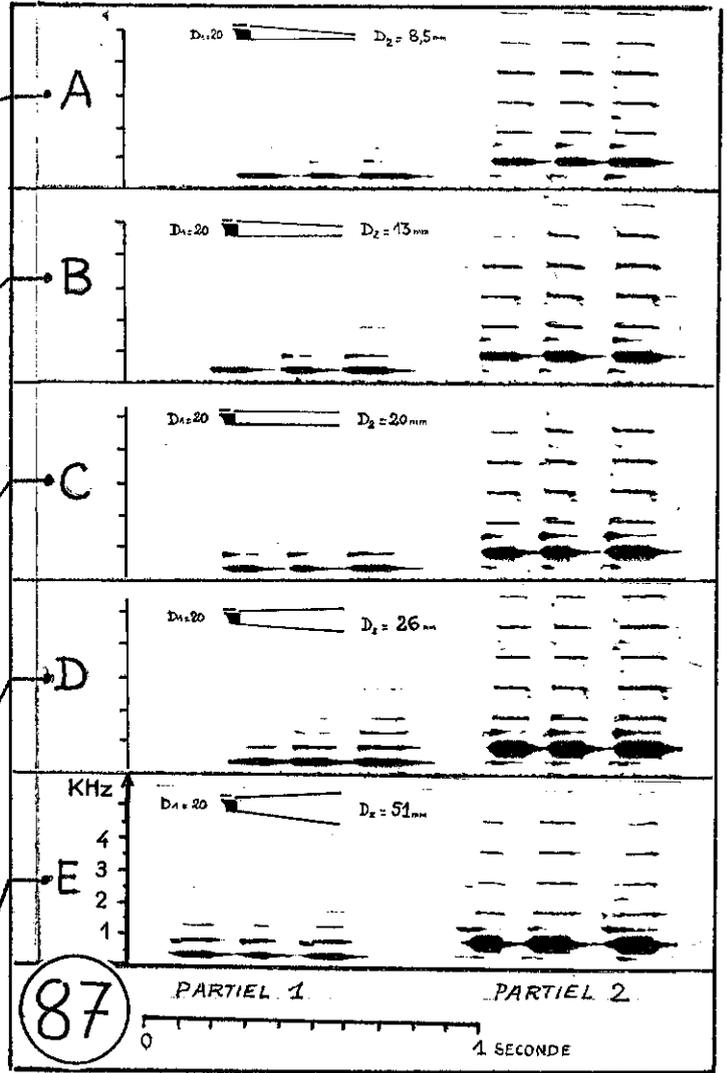
§ 3.63 - Tuyaux cylindro-coniques, ouverts aux 2 bouts. Rappel de la théorie.

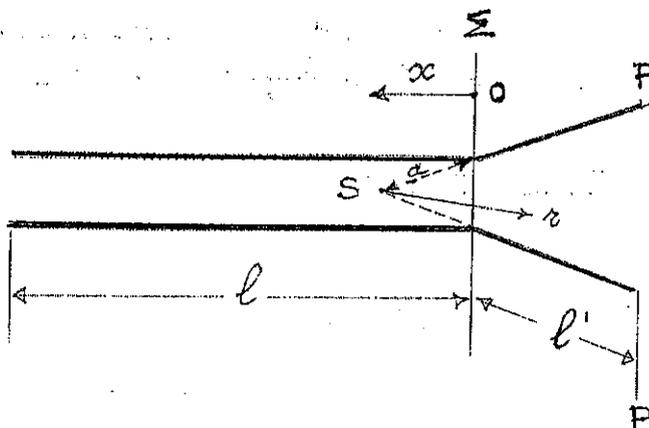
a) - cylindre et cône divergent :

Dans son ouvrage Instruments à vent (T.I. p.304 à 326), BOUASSE pose le problème de la façon suivante :



88





Etant donné un tube cylindrique ouvert aux deux bouts, de longueur l , prolongé par un tronç de cône de longueur l' , nous pouvons écrire les potentiels :

$$\text{dans le cylindre : } \Phi = M \cos kx + N \sin kx$$

$$\text{dans le cône : } r\varphi = A \cos kr + B \sin kr$$

Dans le plan de raccordement Σ ($x = 0$ et $r = a$), les pressions sont égales et

$$\varphi = \Phi = M$$

$$\text{d'où } aM = A \cos ka + B \sin ka \quad (1)$$

Toujours dans le plan Σ les vitesses sont égales et de signe opposé, donc :

$$\begin{aligned} \frac{\delta\Phi}{\delta x} + \frac{\delta\varphi}{\delta r} &= 0 \\ \frac{\delta\Phi}{\delta x} &= -kM \sin kx + kN \cos kx \quad \text{et pour } x = 0, \quad \frac{\delta\Phi}{\delta x} = kN \\ \text{en } r = a \quad \frac{\delta\varphi}{\delta r} &= -\frac{(A \cos ka + B \sin ka) - a(-kA \sin ka + kB \cos ka)}{a^2} \\ &= \frac{k}{a} (-A \sin ka + B \cos ka) - \frac{A \cos ka + B \sin ka}{a^2} \quad (3) \end{aligned}$$

A l'extrémité ouverte PP on a $\varphi = 0$ et $r = l' + a$

$$\text{d'où } A \cos k(l' + a) + B \sin k(l' + a) = 0 \quad (2)$$

En utilisant (2) et en divisant (3) par (1) on aboutit à

$$\boxed{\frac{N}{M} = \cotg kl' + \frac{1}{ak}} \quad \text{où } k = 2\pi/\lambda$$

Dans le cas que nous envisageons, le tuyau étant ouvert aux deux bouts on a $\Phi = 0$ pour $x = l$, ce qui donne $\frac{N}{M} = -\cotg kl$ et $-\frac{1}{\tg kl} + \frac{1}{\tg kl'} + \frac{1}{ak} = 0$

$$\text{On pose } \alpha = kl \quad \beta = \frac{a}{l} \quad \gamma = \frac{l'}{l}$$

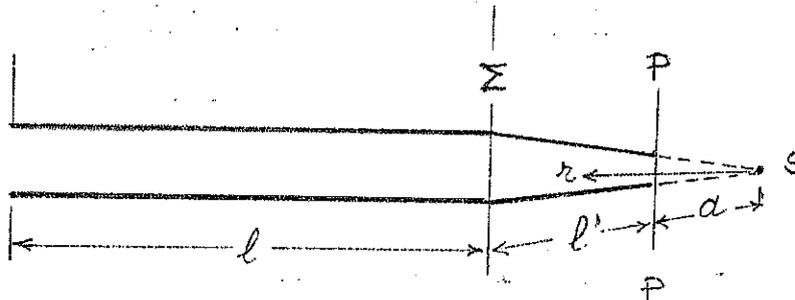
et l'on obtient deux équations

$$\begin{cases} z = \cotg \alpha + \cotg \gamma \alpha \\ y = -\frac{1}{\alpha\beta} \end{cases}$$

.... /

dont les solutions sont les valeurs de α cherchées. On aboutit finalement à la fréquence par la relation $\alpha = \frac{2\pi l}{\lambda} = \frac{2\pi N l}{V}$ et $N = \frac{\alpha V}{2\pi l}$.

b) - Cylindre et cône convergent :



BOUASSE ne traite que des cylindro-cônes divergents. En procédant exactement de la même manière et en posant que dans le plan Σ les vitesses sont égales et de même signe on aboutit à l'équation générale :

$$\frac{N}{M} = \cotg kl' - \frac{1}{k(l' + a)} \quad \text{où } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

et pour un tuyau ouvert aux deux bouts

$$\frac{1}{\tg kl} + \frac{1}{\tg kl'} - \frac{1}{k(l' + a)} = 0$$

ce qui, en adoptant les mêmes notations $\alpha = kl$, $\beta = \frac{a}{l}$, $\gamma = \frac{l'}{l}$ conduit au système d'équations :

$$\begin{cases} z = \cotg \alpha + \cotg \alpha \gamma \\ y = \frac{1}{\alpha (\beta + \gamma)} \end{cases}$$

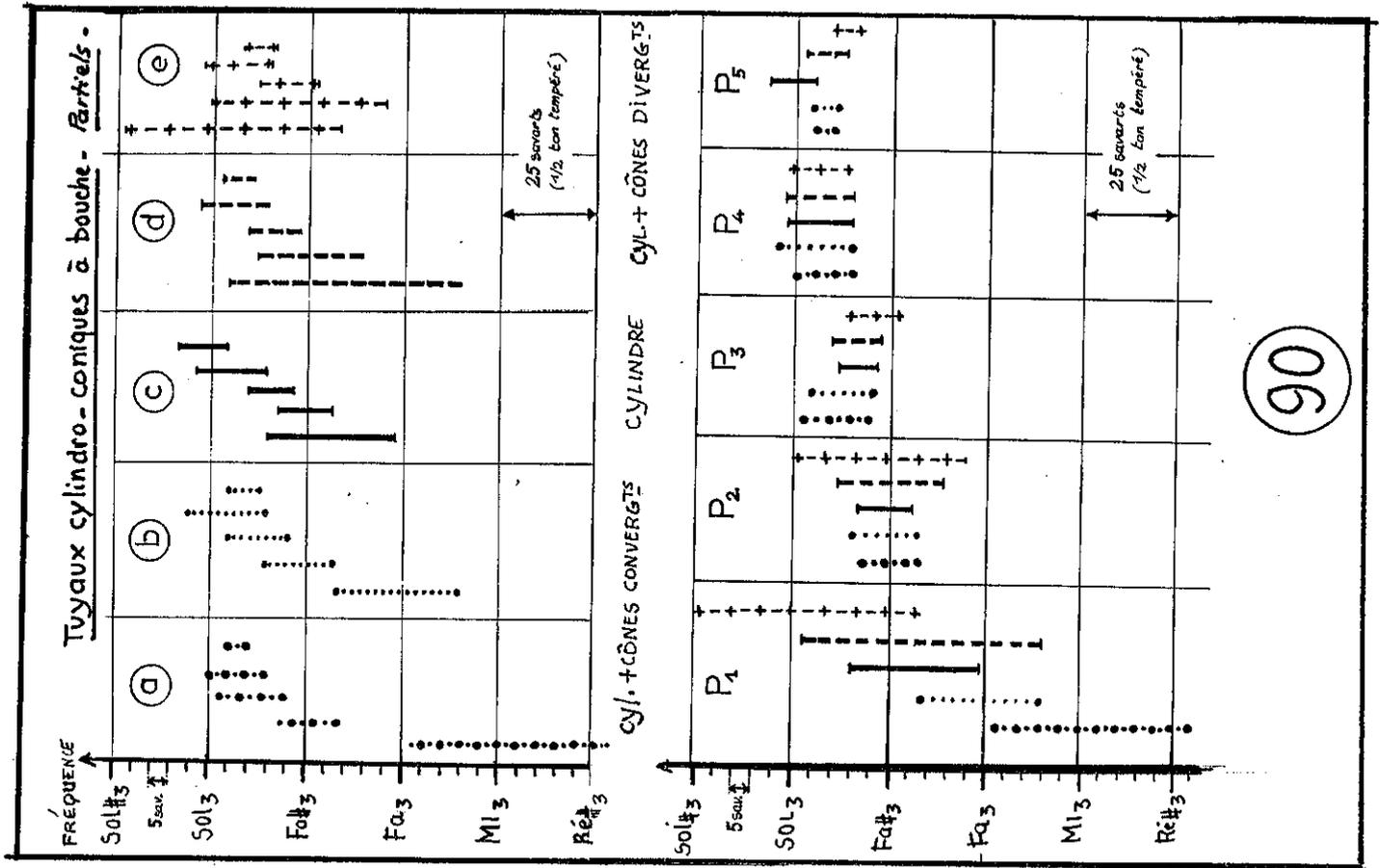
Excepté dans le cas où $a = \infty$ (ce qui nous ramène à un tuyau cylindrique de longueur $(l + l')$) on peut prévoir que les partiels des cylindro-cônes convergents ou divergents ne seront pas harmoniques. En effet, les intersections de la tangente z avec l'hyperbole y donnent pour α des valeurs qui ne sont pas dans des rapports simples.

Nous allons rendre compte maintenant de deux expériences à propos desquelles nous reviendrons sur ces équations et qui permettront de confronter les résultats expérimentaux avec les données théoriques.

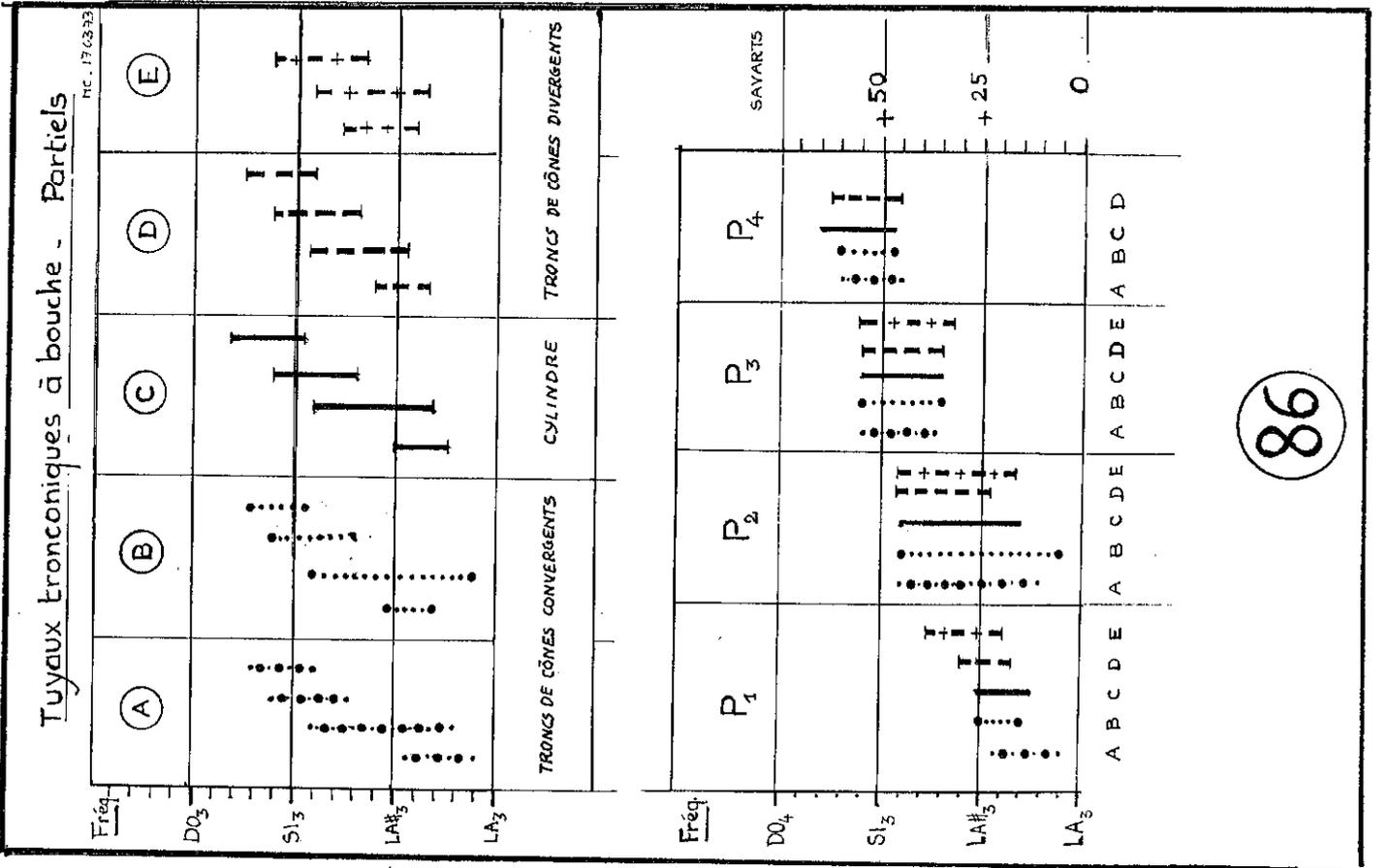
§ 3.64 - Excitation au bout cylindrique. Comparaison des cylindro-cônes convergents ou divergents et du tuyau cylindrique de même longueur (fréquence des partiels et timbre)

Pour cette expérience reprenons les 5 tuyaux A, B, C, D, E utilisés précédemment, dont les dimensions sont données au Tableau I,* et intercalons une portion de tube cylindrique ($l = 110$, $\varnothing = 20$) entre la bouche et le départ du tronç de cône. Nous obtenons ainsi des tuyaux a, b, c, d, e, dont la longueur totale est voisine de celle d'une flûte à bec alto (410 mm).

* p.57



90



86

fig.90. a) - Le relevé du champ de liberté en fréquence des partiels des divers tuyaux est donné fig. 90.

fig.86

Par comparaison avec les tuyaux tronconiques étudiés précédemment (fig.86) on remarque immédiatement que les partiels sont modifiés dans le même sens mais que les différences entre les tuyaux sont beaucoup plus accentuées surtout en ce qui concerne le partiel 1.

EX : si l'on prend le tuyau entièrement cylindrique C comme référence, on lit :

- cylindro-cône (a), abaissement du partiel 1 d'environ 50 sav. (fig.90) au lieu de 10 sav. (fig.86) pour le tronc de cône A.
- cylindro-cône (b), abaissement d'environ 25 sav. au lieu de 0 sav. pour le tronc de cône B.

De même, l'élévation de fréquence du fondamental est accrue pour les cylindro-cônes divergents. Dans le cas du tuyau (e), l'intervalle entre les partiels 1 et 2 est inférieur à l'octave (d'environ un demi-ton).

Remarque - Le fait que les champs de liberté soient plus étendus que ceux de la fig.86 provient de ce que la bouche employée dans cette expérience est différente.

On retiendra que l'adjonction à un tuyau cylindrique, d'une portion de tuyau de conicité même très faible, (l'angle au sommet des cônes A,B,D est voisin de 1°) modifie de façon notable la fréquence du fondamental.

b) - Comparaison des résultats expérimentaux avec la théorie.

Donnons β et γ les valeurs correspondant aux conditions de notre expérience et traçons d'une part la courbe $z = \cotg \alpha + \cotg 2,72 \alpha$

et d'autre part les courbes :

$$y_A = \frac{1}{4,74 \alpha} \quad y_B = \frac{1}{7,77 \alpha} \quad y_D = - \frac{1}{8,42 \alpha} \quad y_E = - \frac{1}{1,76 \alpha}$$

la courbe y_C (tuyau cylindrique $a = \infty$) coïncide avec l'axe OX.

Les intersections de la courbe z avec chacune des courbes y donnent pour chaque cylindro-cône les valeurs $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ etc... à partir desquelles on calcule les fréquences des partiels selon la formule

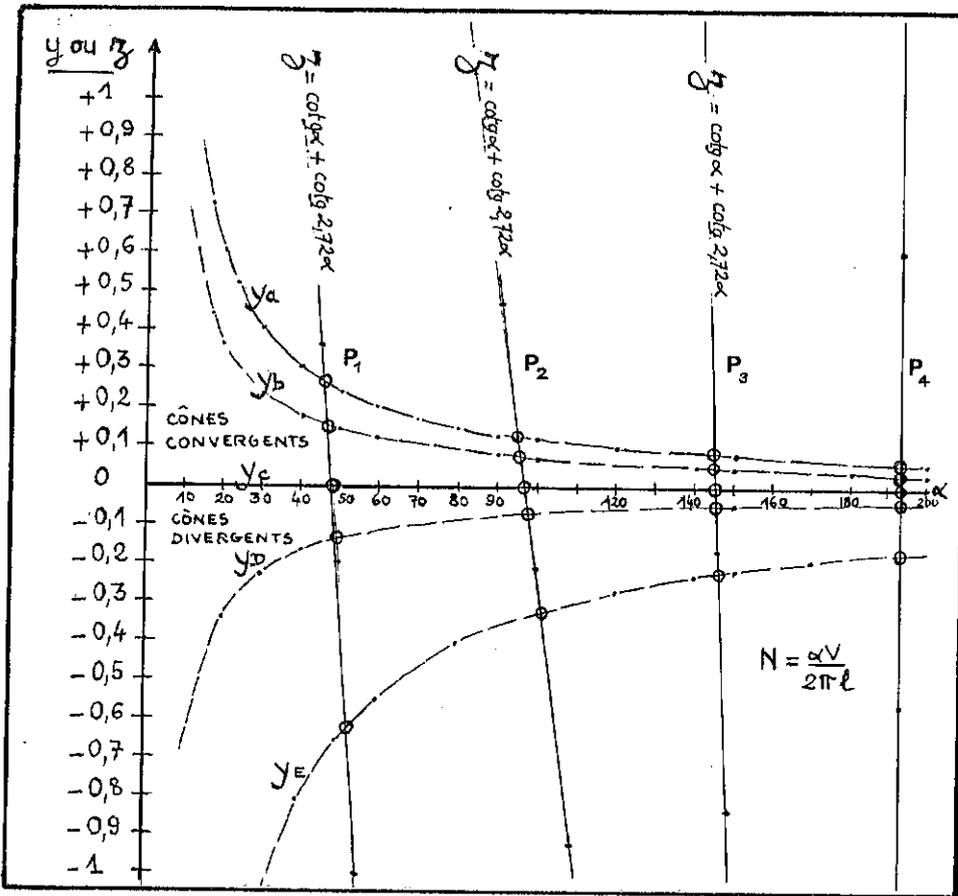
$$N = \frac{\alpha V}{2 \pi l}$$

fig.91 L'examen de la figure 91 permet de faire les remarques suivantes :

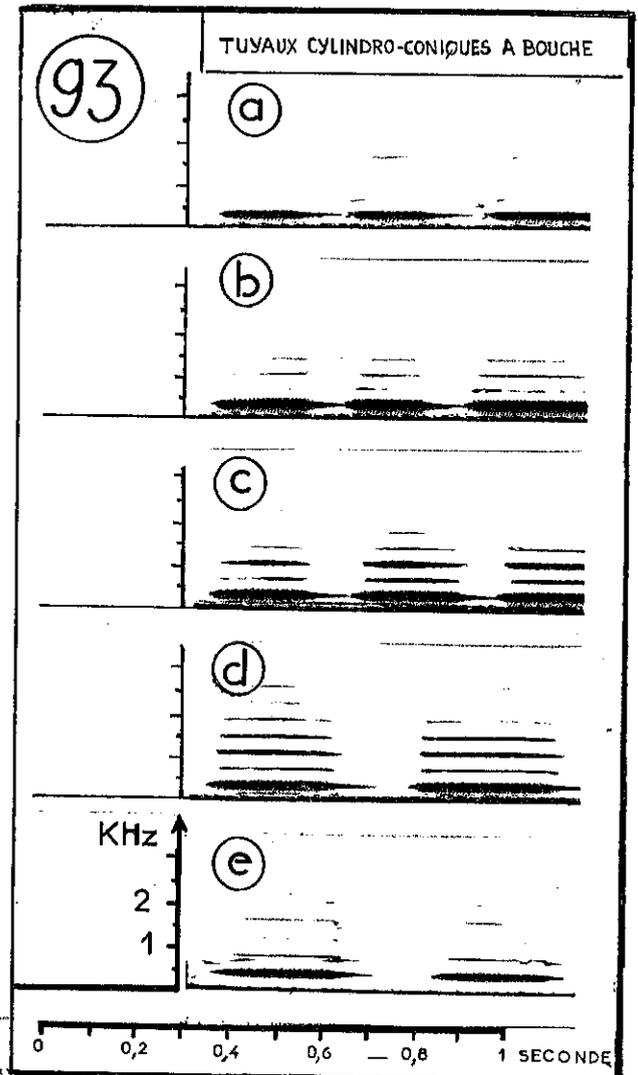
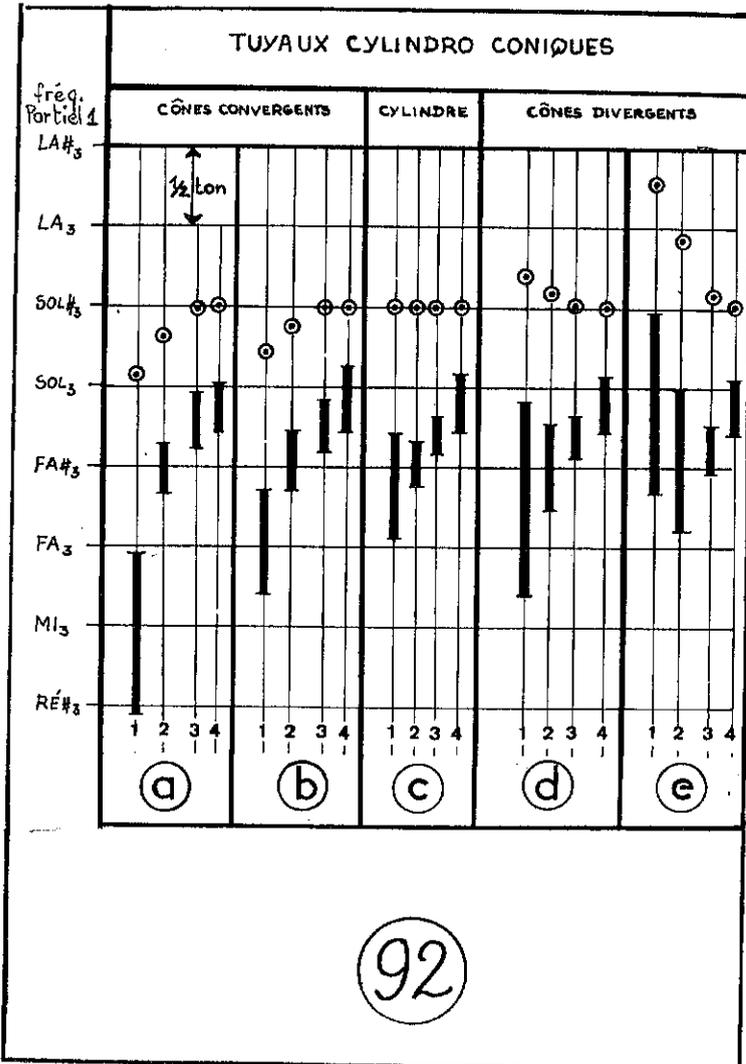
- les partiels des cylindro-cônes sont inharmoniques.
- l'inharmonicité décroît avec le rang du partiel.
- par comparaison avec le cylindre, le cylindro-cône convergent abaisse la fréquence des partiels et le cylindro-cône divergent l'élève.

fig.92 On reporte maintenant sur une autre figure (92) les fréquences calculées, converties en notes de musique, conjointement avec les résultats expérimentaux.

D'une façon générale, les points calculés sont tous plus aigus que les fréquences réelles mesurées; c'est évident puisque les formules théoriques supposent un tuyau ouvert aux 2 bouts. La fermeture partielle à la bouche abaisse tous les partiels



91



d'une même quantité de Hz, donc d'un intervalle musical d'autant plus grand que le partiel est de rang plus petit. Le phénomène se lit très clairement en (c) (cylindre). Pour les cylindro-cônes convergents (a et b), l'abaissement dû à la fermeture partielle à la bouche cumule avec celui qui provient du cône. Ex : pour le tuyau (a), le partiel 2 est supérieur d'environ 30 savarts à l'octave du partiel 1 dans notre expérience, alors que le calcul ne donne que 12 savarts. Au contraire, pour les cylindro-cônes divergents, la fermeture à la bouche compense en partie l'effet dû au cône, ou même l'inverse. En particulier ceci explique que le partiel 4 du tuyau (e) fasse avec le partiel 3 un intervalle supérieur à la quarte. Il en va de même pour les partiels 3 et 4 du tuyau (d).

En conclusion, une théorie plus élaborée, tenant compte de la fermeture partielle à la bouche serait sans doute satisfaisante pour prévoir les rapports de fréquence des partiels selon que l'on adjoint au tuyau cylindrique, un tronc de cône divergent ou convergent.

c) - Timbre et attaque des sons.

fig.93 Nous avons joué et enregistré les 5 tuyaux successivement, dans les mêmes conditions que pour les tuyaux tronconiques (fig.93).

Bien que la bouche soit différente, on constate la même évolution spectrographique, du cylindro-cône le plus convergent (a) au plus divergent (e); le timbre, d'abord très pauvre s'enrichit graduellement, le son le plus intense et le plus éclatant étant émis par le tuyau (d). Avec (e) le timbre s'appauvrit à nouveau.

Mêmes remarques en ce qui concerne l'attaque, très mauvaise pour les tuyaux (a), (b) et (e); assez bonne en (c), excellente en (d).

§ 3.65 - Rôle du rapport de longueur des parties cylindrique et conique.

a) - Fréquences des partiels :

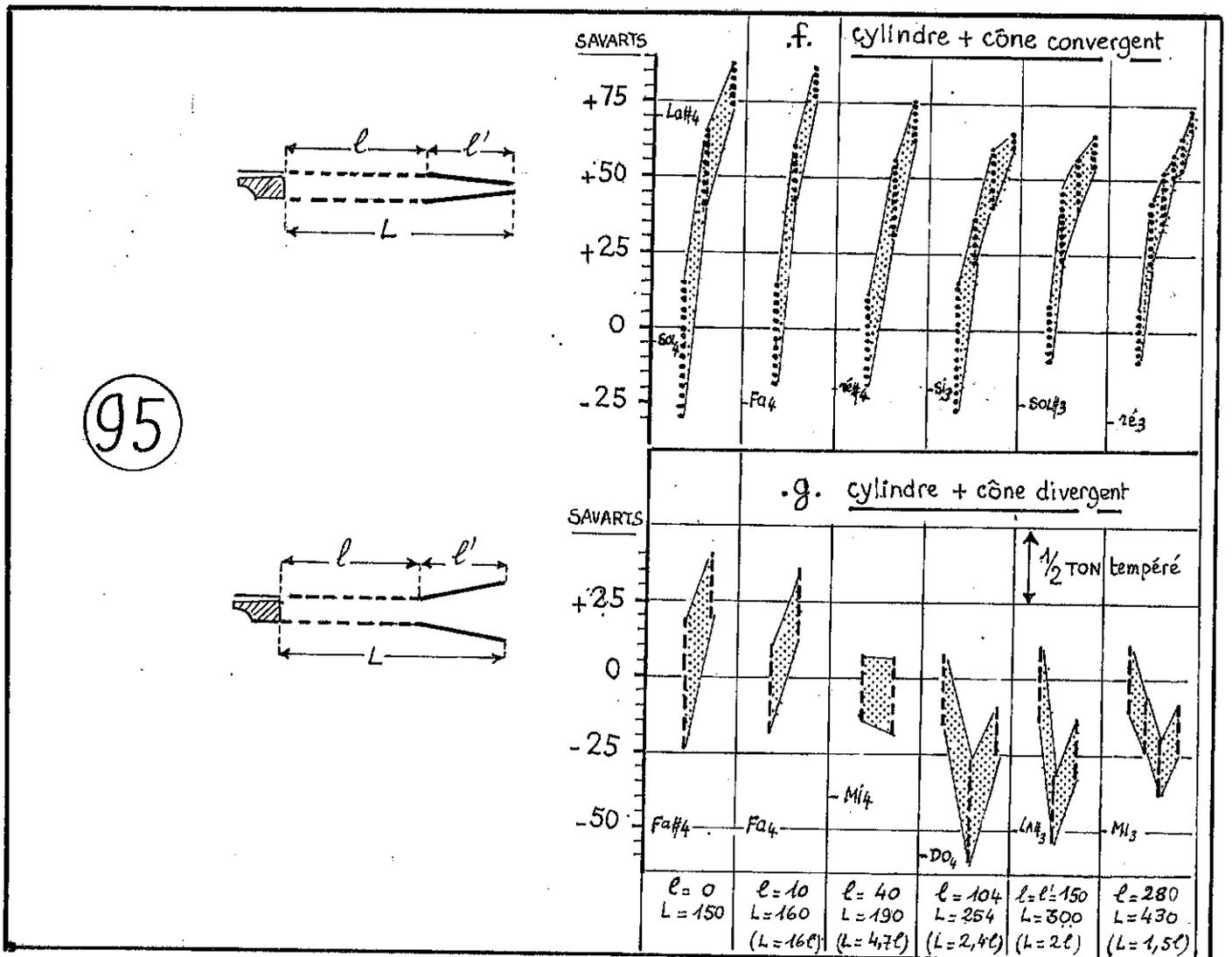
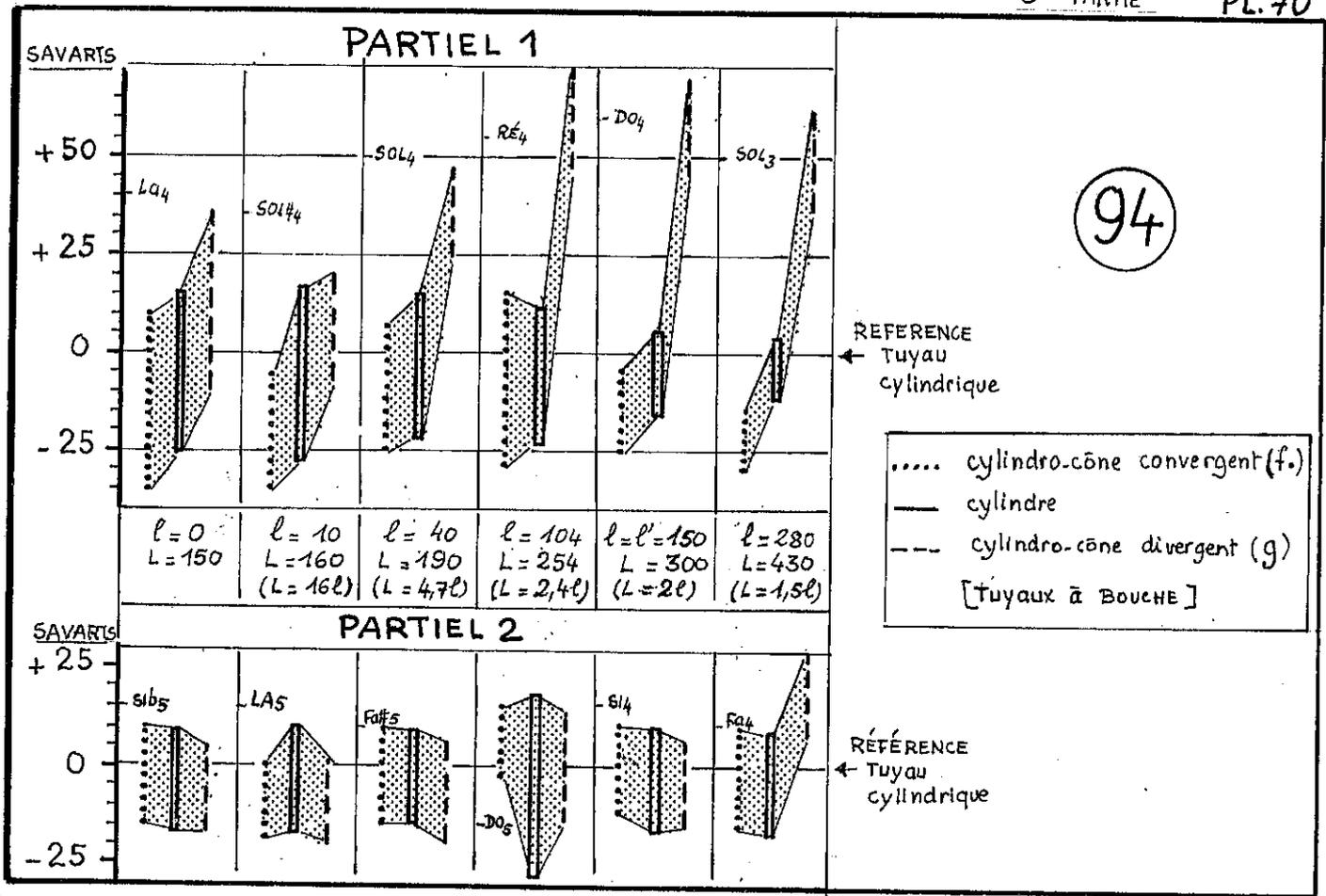
Prenons les deux troncs de cône F et G (cf. dimensions dans le tableau I). Ils ont une extrémité P de même diamètre ($D = 20$ mm) à laquelle nous adaptons une embouchure de flûte à bec. Relevons le champ de liberté en fréquence des partiels. Puis, entre la bouche et l'extrémité P, intercalons successivement des portions de tube cylindrique ($D = 20$ mm) ayant respectivement 10, 40, 104, 150 et 280 mm de longueur. A chaque nouvelle longueur nous relevons les champs de liberté des partiels de ces deux tuyaux, de même que ceux d'un troisième tuyau entièrement cylindrique et de longueur équivalente, qui servira de référence. Dans tous les cas la fréquence fondamentale des tuyaux diminue avec l'allongement, mais à longueur égale elle diminue plus vite pour le tuyau F terminé par un cône convergent, que pour le tuyau G terminé par un cône divergent.

Pour mieux exploiter les résultats nous les représentons de 2 façons différentes.

fig.94

Fig. 94 on voit les champs de liberté en fréquence des partiels 1 et 2 de chacun des tuyaux, en fonction de l'allongement de la partie cylindrique. Le tuyau entièrement cylindrique est pris comme référence. Le partiel 1 du tuyau cylindro-conique convergent (F) reste très proche de celui du cylindre tant que l reste inférieur à la moitié de la longueur totale L ; au delà il est plus abaissé.

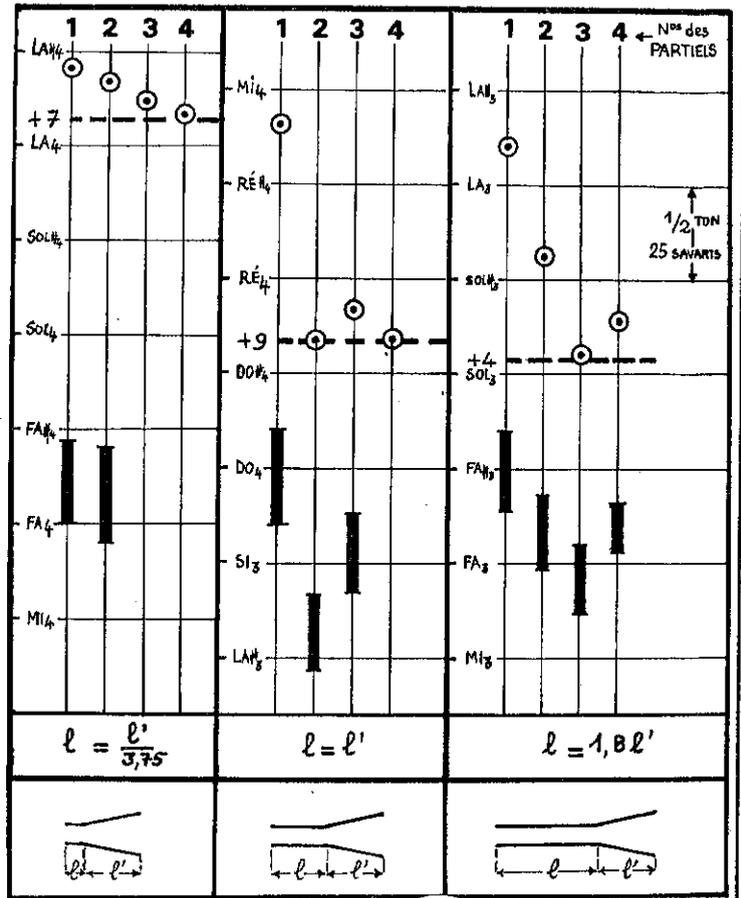
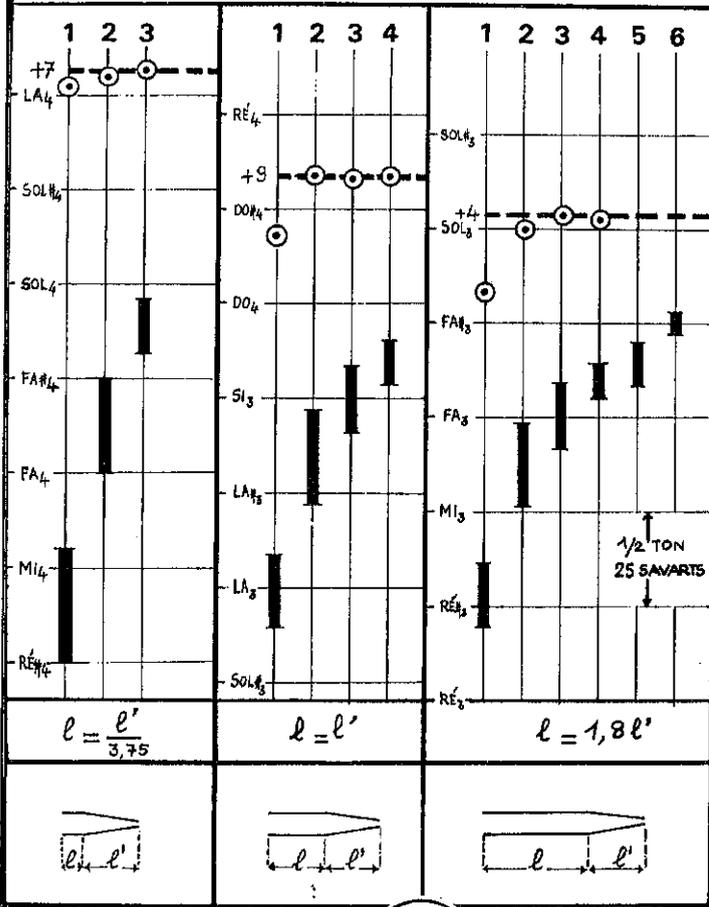
Les variations de fréquence du cylindro-cône divergent sont plus marquées et plus complexes. Pour $l = L/5$ environ, le partiel 1 est plus haut d'un demi-ton,



TUYAUX CYLINDRO-CONIQUES CONVERGENTS

CYLINDRE + CÔNE DIVERGENT

⊙ CALCUL (tuyau ouvert aux deux bouts)
 I EXPÉRIENCE (tuyau à bouche)



96a

96b

	TUYAU cylindrique	TUYAU cylindro-conique CONVERGENT	TUYAU cylindro-conique DIVERGENT
FRÉQUENCE DU PARTIEL 1			
SOL #3			
SOL 3			
FA #3			
FA 3			
MI 3			
RÉ #3			
	$D = 20\text{ mm}$ $L = 413\text{ mm}$	$D = 20\text{ mm}$ $d = 17,3\text{ mm}$	$D = 20\text{ mm}$ $d = 35,5\text{ mm}$

97

L'écart avec le tuyau cylindrique croît avec l puis semble se réduire.

Quant au partiel 2 on note peu de différences entre les tuyaux sauf pour $l = 281$ mm où le tuyau divergent est notablement plus haut.

fig.95

Si maintenant nous voulons apprécier la justesse des partiels de ces tuyaux nous nous reportons à la fig.95 où l'on voit les partiels des deux cylindro-cônes regroupés par longueur de tuyau en prenant chaque fois le partiel 1 comme référence. Les partiels du tuyau entièrement cylindrique, très proches de ceux du tuyau F ne sont pas représentés.

En conclusion on peut faire les remarques suivantes :

- le nombre de partiels qu'il est possible d'émettre croît avec l'allongement du tuyau.
- Tuyau (f) (cylindro-cône convergent) : l'inharmonicité des partiels diminue graduellement avec l'allongement sauf l'intervalle $P_1 P_2$ qui croît de $l = 104$ à $l = 1'$.
- Tuyau (g) (cylindro-cône divergent) : l'intervalle $P_1 P_2$, d'abord supérieur à l'octave pour $l = 0$ et $l = 10$, devient juste pour $l = 40$ puis continue à diminuer, passe par un minimum ($l = 1'$) et croît de nouveau. On voit également que le partiel 3 qui n'apparaît que pour $l = 104$ est plus bas que l'harmonique 3 du fondamental et baisse avec l'accroissement de l .
- étant donné que du point de vue musical on prend spontanément le partiel 1 comme référence pour estimer les intervalles des autres partiels on voit que l'on se trouve dans le cas du cône divergent devant des résultats apparemment paradoxaux. Il est intéressant de voir dans quelle mesure ces résultats concordent avec les calculs que l'on peut faire à partir de la théorie exposée précédemment.

b - Comparaison entre les calculs et les résultats expérimentaux.

Nous n'avons calculé les fréquences de partiels que dans 3 cas :
 $l = 10$ ($l = 1'/15$), $l = 150$ ($l = 1'$) et $l = 280$ ($l = 1,8 1'$).

fig.96a
et b

Portons les résultats fig.96 a et b. Comme précédemment, les calculs portent sur des tuyaux ouverts aux deux bouts, donc les fréquences obtenues sont toujours supérieures aux fréquences mesurées, l'écart étant respectivement de

140 sav., 80 sav., 75 sav. pour les cylindro-cônes convergents
 105 sav., 85 sav., 80 sav. pour les cylindro-cônes divergents.

L'écart diminue donc avec l'allongement du tuyau.

L'examen attentif de ces deux figures montre que dans l'ensemble les points calculés donnent bien le sens de la modification en fréquence des partiels, aussi bien pour les partiels successifs d'un même tuyau que par comparaison, pour un partiel donné, avec le tuyau cylindrique de même longueur.

A l'issue de cette expérience on comprend pourquoi les cylindro-cônes divergents ne sont pas utilisés dans la facture des flûtes. Ils produisent d'importantes perturbations dans la justesse des 2 ou 3 premiers partiels qui sont normalement employés dans le jeu de l'instrument. Dans les instruments à embouchure de cor au contraire, on n'utilise, que les partiels de rang élevé, à partir du 3ème environ. Or nous avons vu qu'ils se rapprochent de plus en plus de ceux de la série normale d'un tuyau cylindrique, et de plus le timbre est éclatant.

...../



§ 3.66 - Excitation au bout conique ou au bout cylindrique - justesse des partiels

Pour terminer cette série d'expériences nous avons voulu comparer les résultats obtenus en excitant un même tuyau, successivement du côté cylindrique puis du côté conique.

Reprenons les troncs de cône F (convergent) et G (divergent) et raccordons à l'extrémité commune de 20 mm un tube cylindrique de même diamètre et de longueur 253 mm. Comme précédemment nous ferons aussi l'expérience avec un tuyau entièrement cylindrique de même longueur totale, qui nous servira de référence.

Plaçons l'embouchure de flûte à bec (coupée à ras du biseau) successivement à chacune des 2 extrémités des deux cylindro-cônes et au tuyau cylindrique.

a) - Champ de liberté en fréquence des partiels.

Le relevé des partiels obtenu en jouant les tuyaux dans les 5 cas considérés fig.97 est montré fig. 97.

Cas I - Tuyau cylindrique

Nous constatons une fois de plus que la fermeture partielle à la bouche a pour conséquence que les partiels sont plus aigus que les harmoniques du partiel 1.

Cas II - Cylindro-cône convergent excité au bout cylindrique.

Par comparaison avec le cylindre, le partiel 1 est nettement abaissé (environ 15 savarts) ce qui augmente encore l'intervalle $P1/P2$, déjà supérieur à l'octave. Les autres partiels ne sont apparemment pas modifiés.

Cas III - Cylindro-cône convergent excité au bout conique.

Toujours par comparaison avec le cylindre, on voit que le partiel 1 est légèrement abaissé mais surtout que les partiels 2,3,4 et 5 sont nettement plus aigus. Les données théoriques selon lesquelles il est équivalent de disposer la partie conique à l'embouchure ou à l'extrémité ouverte ne sont donc pas vérifiées en pratique (Bib. BÉNADE et FRENCH). Ce cas est celui de la flûte traversière moderne, nous y reviendrons au paragraphe suivant.

Cas IV - Cylindro-cône divergent excité au bout cylindrique.

Les trois premiers partiels sont de fréquence nettement supérieure à celle du cylindre, mais les intervalles $P1/P2$ et $P2/P3$ sont plus petits respectivement que l'octave et la quinta.

Cas V - Cylindro-cône divergent excité au bout conique.

Seuls les trois premiers partiels sortent, d'ailleurs fort difficilement. Ils sont très nettement plus bas que ceux du tuyau cylindrique. Les résultats, là-aussi, sont très différents selon que l'on excite le tuyau côté cylindre ou côté cône.

Voyons maintenant plus en détail le cas III.

§ 3.67 - Application à la flûte traversière moderne

La flûte traversière moderne (modèle Boehm) n'est pas entièrement cylindrique. La partie comprise entre l'embouchure et le raccord de la tête est conique; le diamètre du tuyau qui est de 19 mm va en diminuant progressivement du raccord à l'embouchure, où il atteint 17 mm. Selon les fabricants cette diminution est plus ou moins complexe,

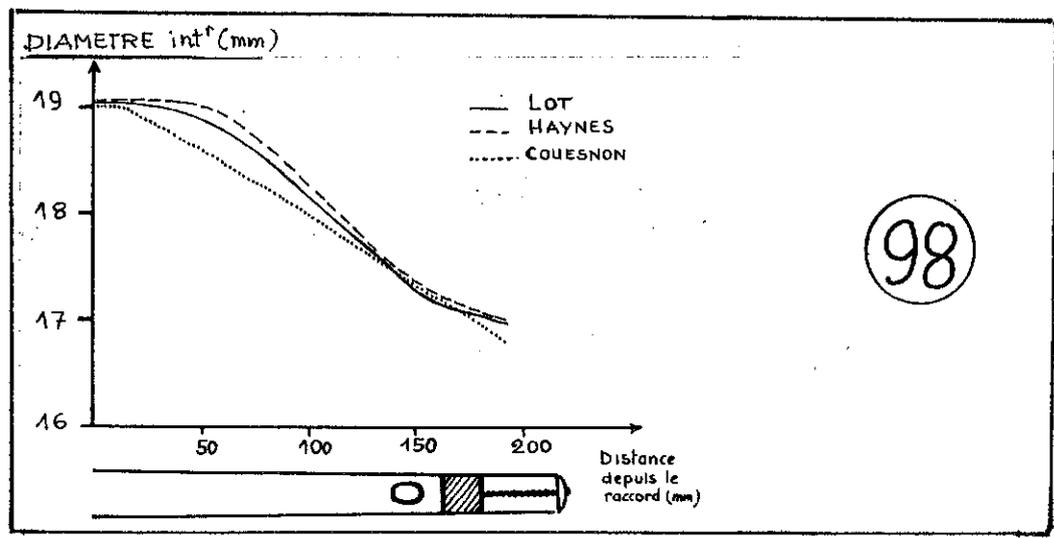
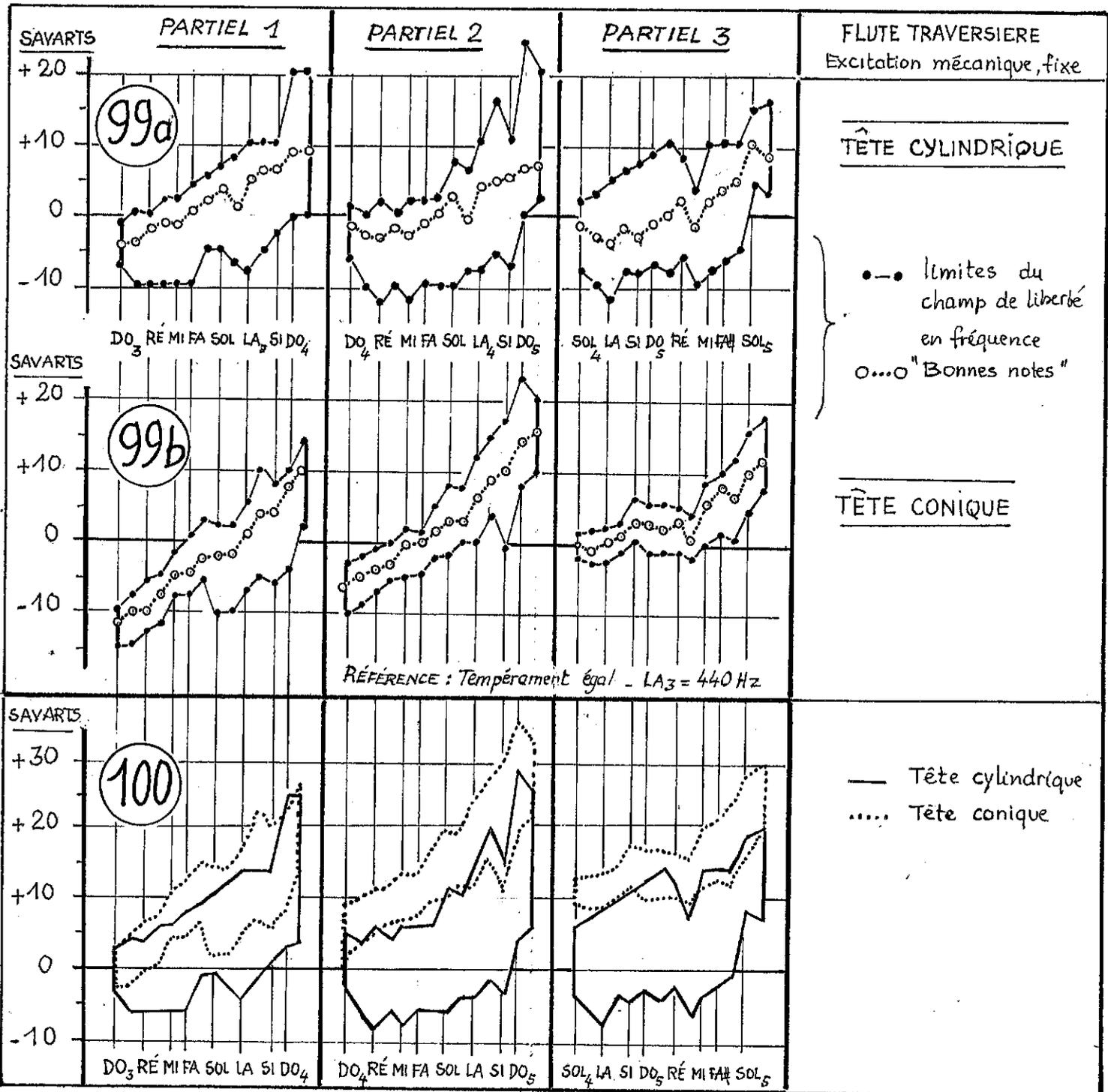


fig.98 allant du simple cône à une figure quasi-parabolique (cf. fig.98).

On lit dans l'ouvrage de BOEHM (Bib. (2) p.14) :

" The bore of the head-joint is gradually reduced in diameter by two millimeters, from the joint upwards to the cork. The free speech of the tone and the correct tuning of the higher octaves depend upon the particular form of this curvilinear reduction in the diameter ".

Afin de mettre en évidence le rôle de l'embouchure conique nous avons fait l'expérience suivante.

EXPERIENCE :

Prenons une flûte traversière normale, système Boehm, et relevons le champ de liberté en fréquence des 12 sons fondamentaux de l'instrument de DO3 à DO4. Puis remplaçons la tête conique par une tête cylindrique de même longueur et de même diamètre que le tube principal, et procédons au même relevé. Pour cette expérience il était nécessaire d'éliminer les variables dues à l'excitation, aussi avons nous utilisé le dispositif mécanique réglable permettant de produire un jet convenable, d'orientation fixe (cf. § 1.17).

fig.99

Voici fig.99, les résultats obtenus avec l'instrument muni successivement des deux têtes différentes. Le changement d'embouchure ayant nécessité une remise en place du mécanisme d'excitation on ne peut pas être assuré d'avoir retrouvé exactement les mêmes conditions de couverture et d'orientation du jet. Dans les deux cas le dispositif était réglé pour obtenir le meilleur son. On ne tiendra donc pas compte de la différence d'étendue du champ de liberté (plus large avec le tuyau entièrement cylindrique) ni du changement de diapason (DO3 plus bas d'environ 8 savarts avec la tête conique), bien que nous ayons vu, au paragraphe précédent que le fondamental d'un tuyau conico-cylindrique est plus bas que celui du tuyau cylindrique de même longueur. Ces réserves étant faites on peut énoncer les remarques suivantes :

- Tête cylindrique : les 14 fondamentaux de l'instrument s'écartent notablement de la ligne droite de la gamme tempérée prise comme référence. Au fur et à mesure que l'on monte la gamme, les notes sont de plus en plus hautes; l'écart atteint 12 savarts entre le DO3 et le DO \sharp 4. Les partiels 2 et 3 s'éloignent peu des harmoniques du partiel 1.

- Tête conique : l'instrument original paraît encore plus " faux ". Le champ de liberté en fréquence des fondamentaux est encore plus incliné que celui de l'instrument à tête cylindrique; l'écart de justesse entre les notes extrêmes du partiel 1 atteint 20 savarts ! De plus les partiels 2 et 3 sont nettement plus hauts que les harmoniques correspondants du partiel 1. Le phénomène est particulièrement net sur les notes les plus graves de l'instrument.

fig.100

Tout ceci apparaît plus clairement sur la figure 100 où l'on a superposé les champs de liberté des deux instruments ramenés au même diapason pour le DO3.

Pourtant l'instrument normal, à tête conique, permet de jouer juste, contrairement à la flûte entièrement cylindrique sur laquelle l'aigu est trop bas. L'explication est à chercher dans la technique d'embouchure de la flûte traversière. Nous avons vu (§ 2.61) qu'il faut découvrir légèrement l'embouchure pour émettre les notes graves et au contraire, couvrir assez fortement dans l'aigu de l'instrument. COLTMAN a montré (Bib. (1) 1966) que la distance lumière-biseau varie ainsi au cours du jeu, de 6 mm dans le grave à 3,5 mm dans l'aigu.

Le rétrécissement conique de la tête de la flûte traversière permet donc de compenser, par l'élévation des partiels 2 et 3, l'abaissement graduel de fréquence pro-

venant de l'accroissement de la couverture de l'embouchure dans l'aigu de l'instrument

De plus, ce qui n'apparaît pas ici, les partiels sortent plus aisément et en plus grand nombre avec la tête conique, d'où un timbre plus riche en harmoniques.

§ 3.68 - Tuyaux coniques utilisés en facture d'orgue. Spectrographie

De tous temps les facteurs d'orgue ont essayé toutes les formes possibles de tuyaux pour varier le timbre des jeux. En 1618 PRAETORIUS ne cite pas moins de 7 sortes de tuyaux coniques employés dans les orgues allemandes (fig.101). DOM BEDOS en 1766 (fig.102) n'en distingue pratiquement que deux pour l'orgue classique français. Mais l'orgue est un instrument complexe, variable dans sa composition d'une époque à l'autre et d'un pays à l'autre. Nous ne pouvons donc prétendre donner ici une description exhaustive des tuyaux à bouche conique et de leurs caractéristiques acoustiques, d'autant qu'une même dénomination recouvre souvent des jeux différents d'un pays à l'autre. Enfin il y a souvent loin des adjectifs employés par les commentateurs pour caractériser le timbre d'un jeu, à la réalité sonore, car la part de l'harmoniste est prépondérante en ce domaine. Prenons par exemple 7 tuyaux successifs d'un même jeu, donc similaires à tous points de vue (taille, dimensions de la bouche etc...), prêts à être placés dans l'orgue. Les tuyaux parlent mais ne sont pas harmonisés. On voit d'après l'analyse de la figure 103 qu'il serait bien difficile de caractériser le timbre du jeu conique "Gemshorn" d'après cet exemple ! Le facteur ayant "harmonisé" le deuxième tuyau, on peut supposer qu'il donnera aux autres les mêmes caractéristiques sonores : attaque sur l'harmonique 2 et prédominance de celui-ci sur les 5 visibles, encore qu'il faille être prudent puisqu'il s'agit d'une expérience en atelier et que l'harmonisation sera sans nul doute différente dans l'édifice normal de l'instrument.

Les seules données que l'on puisse prévoir d'après la forme générale du tuyau sont : (cf. Expérience du § 3.61)

- cônes convergents : le son s'appauvrit en harmoniques, au profit du fondamental et diminue en intensité à mesure que le cône est plus fermé.
- cône divergent : le son est riche en harmoniques, éclatant, de grande intensité tant que le cône n'est pas trop ouvert.

Voyons maintenant de plus près quelques uns des tuyaux utilisés.

a) - Tuyaux tronconiques convergents

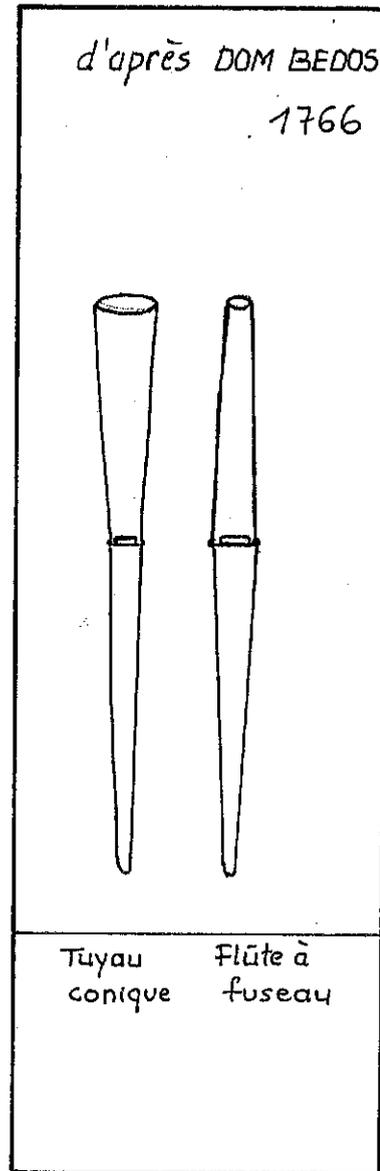
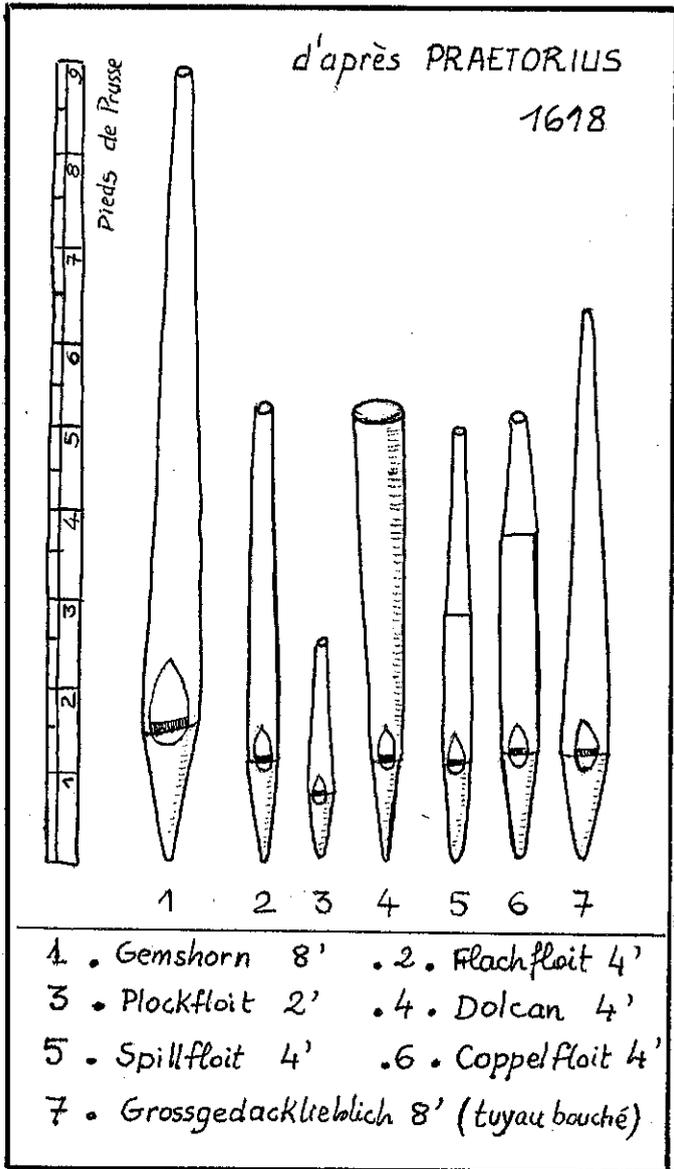
Ce sont les tuyaux coniques les plus répandus. Le type en est la flûte à fuseau de DOM BEDOS dont l'harmonie, nous dit-il, est jeu de nasard de grosse et menue taille. voisine de celle de la flûte à cheminée. On l'emploie dans le

En Allemagne MARENHOLZ (p.81 à 89) distingue principalement :

- la Blockflûte, de grosse taille, au son doux, "rond" mais "clair".
- la Spitzflûte et le Gemshorn, de taille moyenne, au son doux, clair, principalisant.
- la Viola da Gamba, de menue taille, au son "plein", "fort"

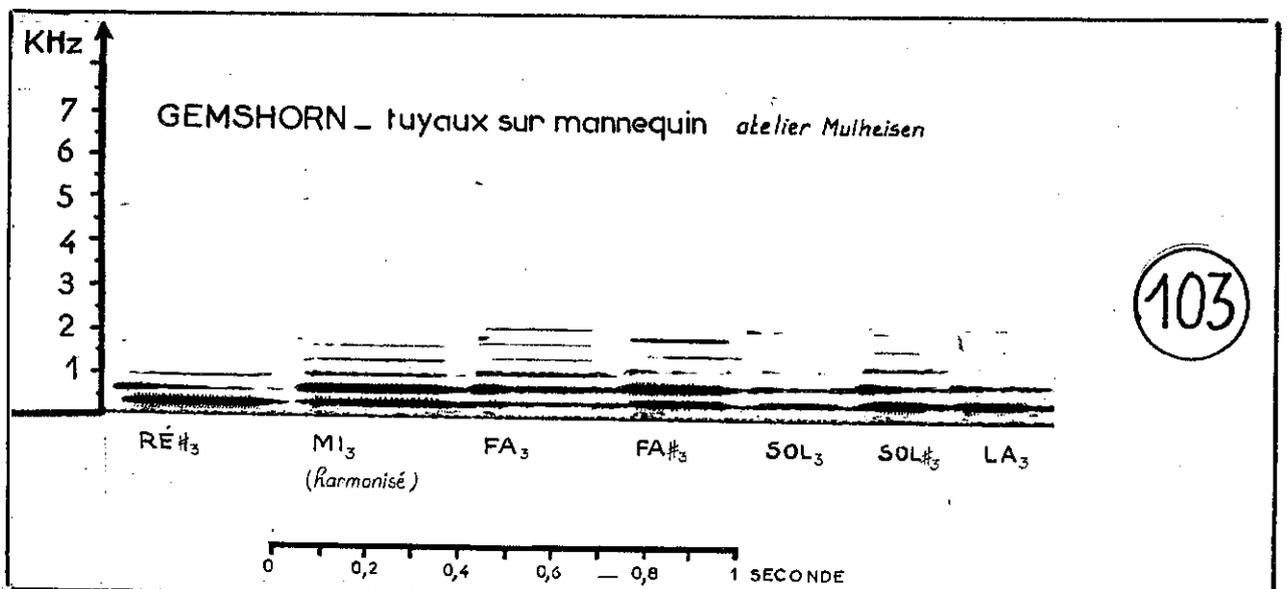
fig.104

Nous avons fait l'analyse (fig.104) de tuyaux coniques employés comme dessus dans un jeu de nasard. On voit bien que les tuyaux ont été harmonisés de telle sorte que le fondamental soit nettement prédominant. En effet le nasard, jeu de mutation, doit se fondre avec l'harmonique 3 du jeu de fond avec lequel on l'emploie. Mis à part le MIB4 (qui serait sans doute à réharmoniser), le raccord avec le jeu à cheminée se fait bien en raison de l'absence d'harmonique 2.



101

102



103

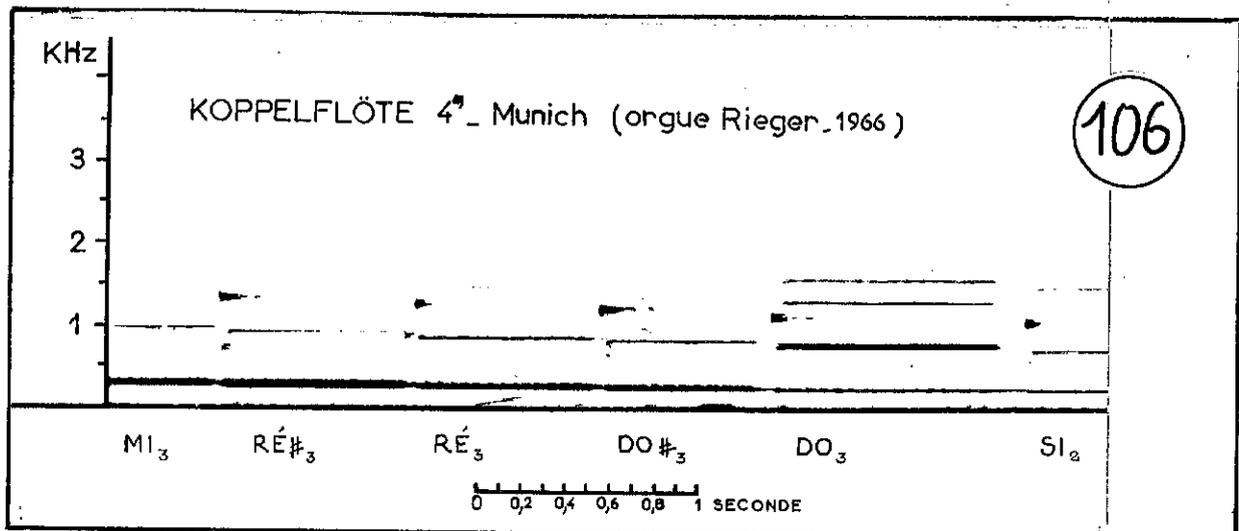
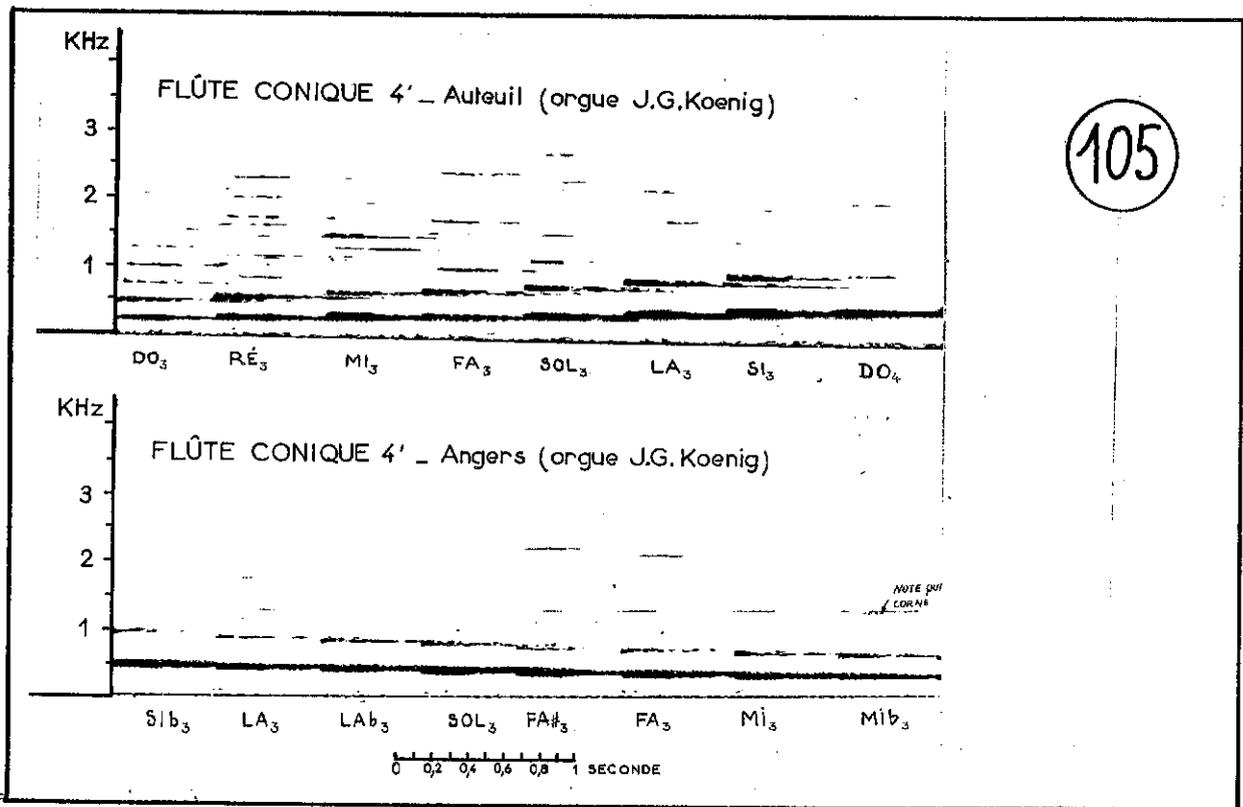
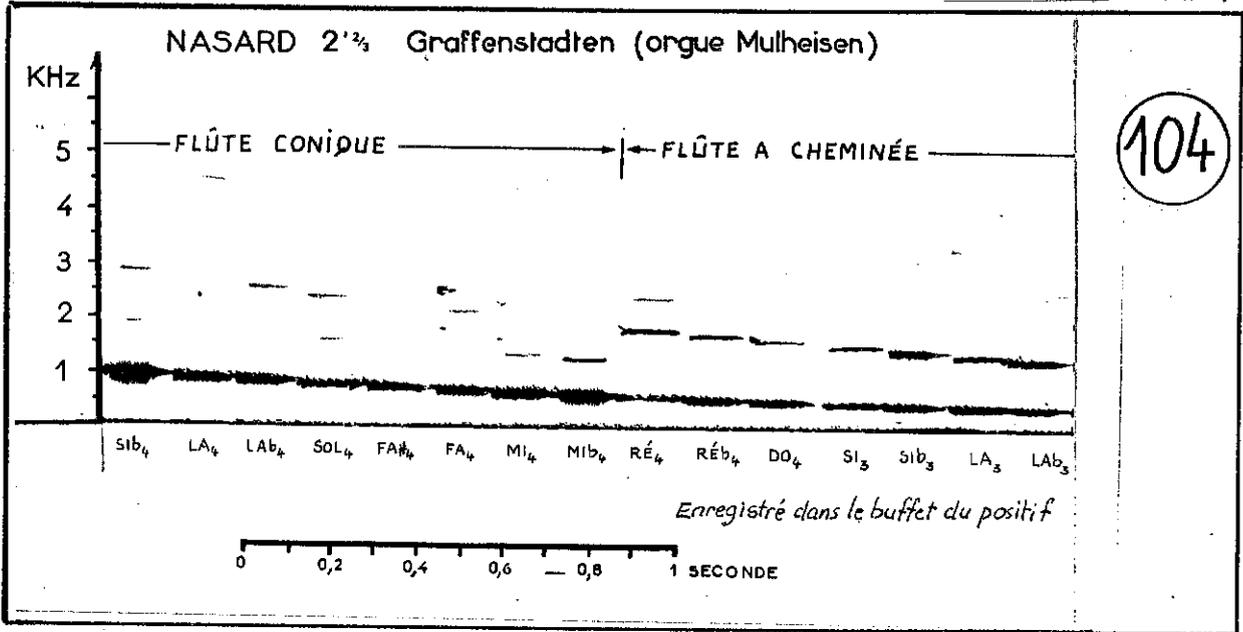


fig.105

Fig. 105 nous montrons l'analyse de quelques tuyaux d'un jeu de flûte conique 4' réalisé par le même facteur à deux années de distance dans deux orgues différents. Dans les deux cas l'enregistrement a été fait à environ 3 m de la façade de l'orgue; (l'église d'Angers et plus réverbérante que celle d'Auteuil).

Les deux jeux (harmonisés par la même personne) sont remarquablement similaires dans leur allure :

- fondamental prédominant,
- harmonique 2 intense à l'attaque, mais peu stable,
- harmonique 3 quasiment absent,
- les autres harmoniques apparaissent de façon variable.
- l'attaque est très franche.

Remarque : Les caractéristiques physiques du timbre d'un jeu se modifient dans l'extrême grave et l'extrême aigu mais on peut considérer que le médium (octaves 3 et 4) dont il s'agit ici est plus particulièrement typique du jeu, car c'est dans cette zone que l'oreille (de l'harmoniste ou de l'auditeur) a les meilleures performances.

b) - Tuyaux tronconiques divergents

C'est le tuyau "conique" de DOM BEDOS, la "Dulziane" de PRAETORIUS ou encore la flûte à pavillon.

Les auteurs sont unanimes pour dire que le timbre de ces tuyaux est puissant, éclatant et qu'il a une grande portée. Mais ce type de jeu a un inconvénient : il tient beaucoup de place sur les sommiers; c'est probablement pourquoi il n'est que rarement employé.

c) - Tuyaux cylindro-coniques

ELLERHORST cite deux sortes de tuyaux déjà figurés dans l'ouvrage de PRAETORIUS :

- la Spillflöte, de taille assez menue et dont la partie cylindrique est à peu près aussi longue que la partie conique.
- la Koppelflöte, de plus grosse taille, munie d'un chapeau assez court (le 1/5 de la longueur totale) et fortement conique ($d = 1/2 D$). La Koppelflöte aurait un son doux, clair et nasal. MARENHOLZ classe ces tuyaux avec les tuyaux à cheminée.

fig.106

Nous montrons fig. 106 l'analyse de quelques tuyaux enregistrés à Munich, sans pouvoir assurer qu'ils ont les dimensions données par ELLERHORST.

N'était-ce l'apparition intermittente des harmoniques 6 et 8 on pourrait croire qu'il s'agit d'un jeu bouché au timbre exceptionnellement clair. On voit aussi que le bruit de bouche, dû ici à l'attaque du partiel 4 du tuyau a été recherché par l'harmoniste.

d) - Tuyaux coniques bouchés

Il existe aussi des tuyaux coniques convergents, bouchés, dont le " Spitzgedackt " allemand est le principal représentant. Nous n'en avons pas d'exemple.

e) - Conclusions

Une étude systématique et comparative du timbre des tuyaux coniques employés en orgue et de leur originalité par rapport aux tuyaux cylindriques reste à faire.

...../

Les variables en cause sont si nombreuses (acoustique du lieu, style de l'instrument, époque, pays, goût de l'harmoniste etc...) qu'il faut un grand nombre d'échantillons pour dégager les caractéristiques sonores d'un type de jou donné.

4) TUYAUX COMPOSITES

§ 3.69 - Généralités

A côté des flûtes à bec à 6 trous, tronconiques, en bois tourné, et de la flûte traversière cylindro-conique que nous venons d'examiner, de nombreux autres instruments ont une perce longitudinale plus complexe, soit en raison des irrégularités du matériaux employé, soit par la volonté délibérée du facteur qui réalise un profil mis au point par des années d'expérience.

Il s'agit dans tous les cas de réaliser le meilleur compromis possible entre diverses exigences :

- la position et les dimensions des trous qui conditionnent la justesse, la maniabilité de l'instrument et sa sonorité.
- les rapports de fréquence des partiels.
- le nombre de partiels possibles.

Tous ces paramètres sont liés entre eux et de plus, pour tenter de comprendre les raisons de la perce d'un instrument donné, il est nécessaire de connaître les conditions de son emploi et les tendances esthétiques de l'époque à laquelle il a été conçu.

fig.107

Nous allons prendre pour exemple quatre instruments types dont nous représentons, fig. 107 le relevé de la perce longitudinale. Il s'agit de la flûte traversière du théâtre Nô Japonais, de la flûte à bec et de la flûte traversière occidentales de l'époque baroque, et du Ney turco-arabe.

Arbitrairement nous avons ramené ces quatre instruments à une même longueur graduée de 0 à 1. Le diamètre est exprimé par le rapport d/l .

On constate, au vu de la figure, que ces instruments s'éloignent passablement des cas simples que nous avons envisagés dans les expériences précédentes. Examinons chacun d'eux en détail.

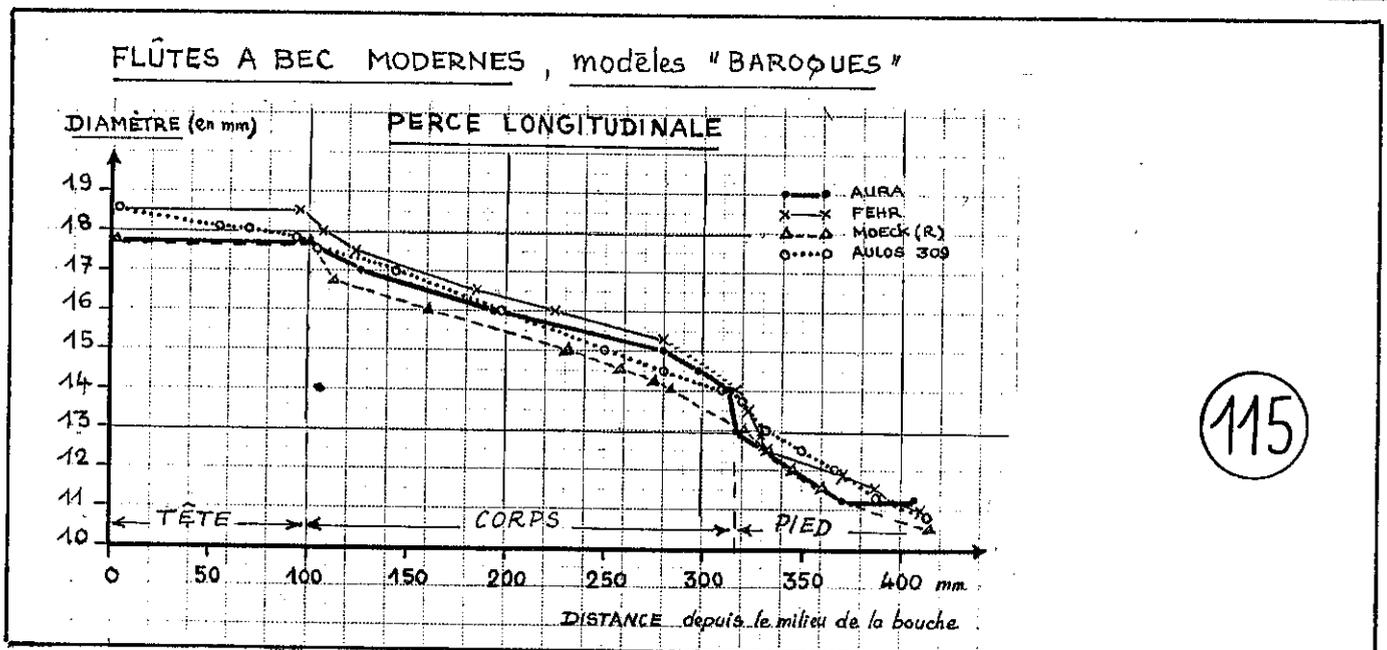
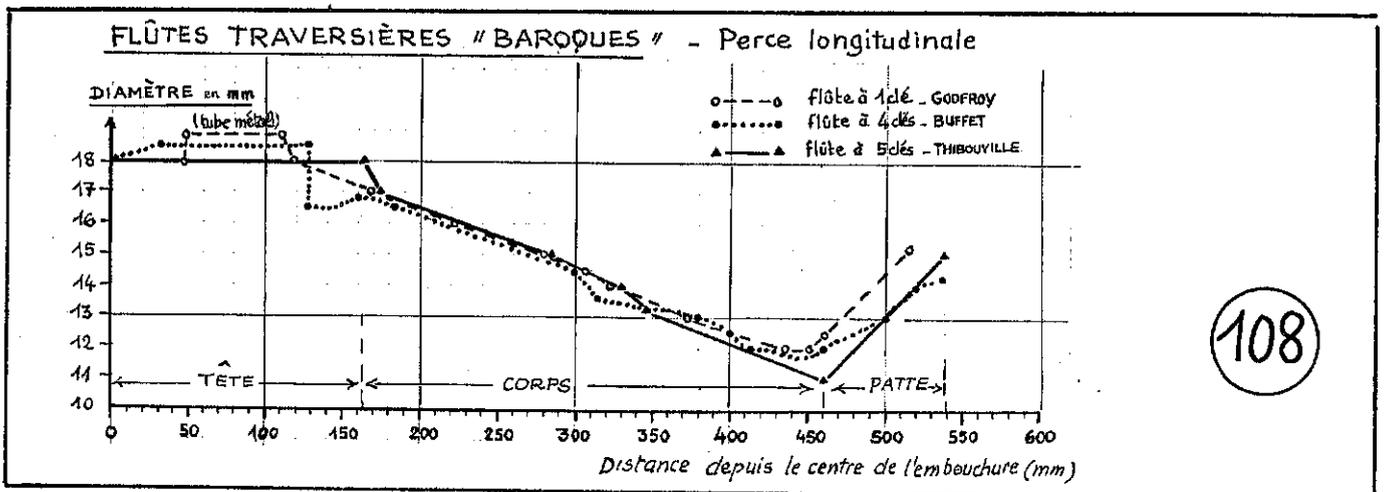
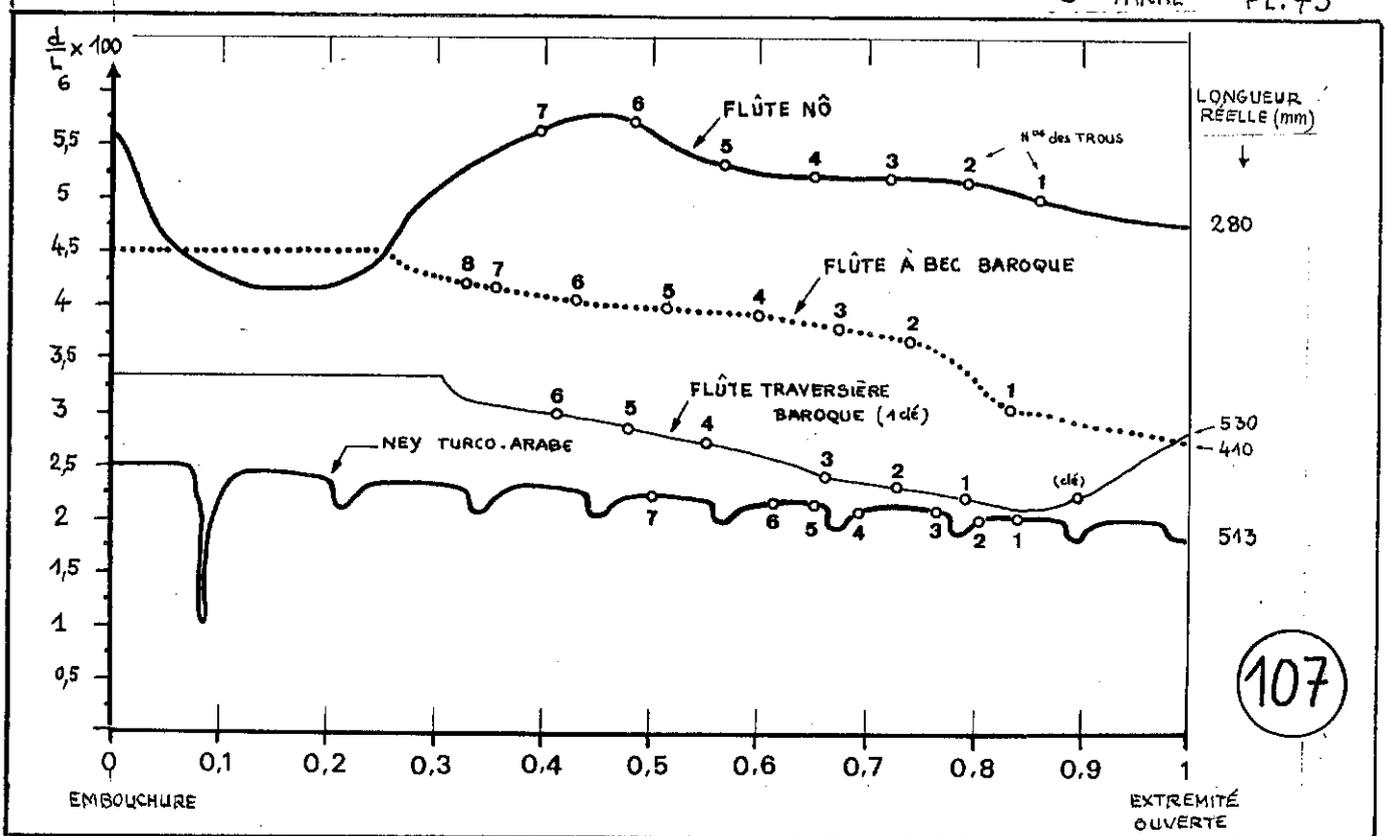
§ 3.70 - Le Ney turco-arabe

Nous avons choisi cette flûte car elle offre un exemple typique d'irrégularités provenant du matériau, ici le roseau. Diverses raisons (§ 3.38) ont amené les facteurs à fixer à 8 le nombre de noeuds que contient la tige d'un ney. Les cloisons intérieures des noeuds, bien que soigneusement évidées (sauf celle qui est proche de l'embouchure) produisent tout de même des étranglements car le matériau est beaucoup plus dur à ces endroits.

Très schématiquement l'instrument présente donc une série de renflements successifs à des intervalles légèrement et régulièrement croissants (lorsqu'on a trouvé un bon roseau!) depuis le bas de l'instrument jusqu'à l'embouchure. La grosseur de la tige croît également dans le même sens.

Nous avons montré, § 3.36 le rôle important du rétrécissement proche de

...../





l'embouchure formé par le 1er noeud incomplètement percé (à dessein), dans l'émission des partiels aigus, de même que celui du cloisonnement du tube dans la justesse et la facilité de liaison des sons.

On ne peut qu'admirer l'ingéniosité des obscurs "inventeurs" du ney qui ont su maîtriser le matériau au point de tirer partie de ses irrégularités.

§ 3.71 - La flûte traversière du théâtre Nô japonais

Elle est faite en bambou mais celui-ci est traité de telle façon (cf. 4^o partie, fiche 10) que le facteur obtient à coup sûr une perce qui a l'allure indiquée sur la figure. Elle a pour particularité essentielle de posséder un rétrécissement important du diamètre, près de l'embouchure, sur environ le 1/3 de la longueur totale. La partie restante du tube va en diminuant graduellement, mais le diamètre à l'extrémité ouverte reste supérieur à celui du rétrécissement.

Nous avons fait une étude sur le rôle de ce rétrécissement (Bib. CASTELLENGO (6)) et nos conclusions rejoignent celles de Y. ANDO (Bib. ANDO (5)). Il s'agit principalement de perturber les rapports de fréquence des partiels successifs de façon à éviter les intervalles d'octave et de quinte entre ceux-ci. Cette démarche est à l'opposé de celle du Ney ou des flûtes occidentales en général, mais elle est en accord avec les principes esthétiques de la musique du Nô caractérisée par l'absence de la notion de consonance, ou de hauteur absolue, et la recherche d'une fluctuation incessante des hauteurs; (Bib. TAMBA A.).

La perce de cet instrument a une autre conséquence, qui découle de la première (faussement des partiels), celle de renforcer l'intensité de l'harmonique 1 au détriment des autres. La flûte de Nô a donc un timbre particulier, et est perçue comme très intense. En effet, la tessiture de l'instrument étant comprise entre 500 et 3000 Hz il faut concentrer l'énergie dans cette zone si l'on veut le meilleur rendement de l'instrument. Ceci était particulièrement important au moment où l'instrument fut conçu puisque les représentations du théâtre Nô avaient lieu en plein air.

§ 3.72 - La flûte traversière " baroque " à une clé

C'est un instrument de taille fine; au plus gros diamètre, $1/d = 30$.

Du point de vue de la perce on distingue trois parties :

- la tête cylindrique,
- le corps conique convergent, à peu près régulier,
- la "patte", conique divergente.

fig.108 Ceci est un schéma général que suivent à peu de choses près des instruments d'époques différentes, comme en témoignent les trois relevés de la figure 108. On note seulement quelques variantes au raccord de la tête et du corps principal. Certains instruments sont en effet gainés de métal sur une portion du tube, mais il semble que les différences de diamètre au raccord soient plutôt accidentelles.

- a) Quels sont les avantages d'une telle perce, peu aisée à réaliser en pratique ?
La raison fondamentale est double : à la fois anatomique et musicale. Selon les données esthétiques de la musique polyphonique occidentale, l'instrument doit permettre de produire des sons de hauteur bien définie, avec virtuosité. Les divers ornements (trilles, cadences, ports de voix, flatterments etc...) précèdent ou suivent la note principale qui doit être bien claire. Au contraire, dans la musique

du nay ou de la flûte n^o, le joueur produit des hauteurs continûment fluctuantes en modifiant l'embouchure ou en agissant sur le recouvrement des trous. Ces deux instruments ont d'ailleurs de grands trous (diamètre supérieur à 8 mm) alors que pour la flûte baroque l'optimum se situe entre 5 et 6 mm, car il est incontestablement plus facile de couvrir vite et précisément des petits trous que des grands. Mais nous savons (§ 3.16) que les partiels sont d'autant plus faux que le rapport d/D est plus petit; or, dans l'instrument que nous étudions, il est impératif que le partiel 2 soit bien à l'octave du premier pour tous les fondamentaux, d étant donné, on diminuera D , c'est à dire le diamètre du tube. Une flûte cylindrique de petit diamètre présente plusieurs inconvénients : le tube doit être plus long, ce qui accroît l'écartement des trous; le fondamental est peu intense, le tuyau a tendance à octavier et du fait de la plus grande couverture de l'embouchure pour l'aigu, les partiels sont un peu bas.

La perce conique résoud donc bien les problèmes :

- pour une même hauteur fondamentale le tube est plus court, ce qui permet de rapprocher les trous les uns des autres.
- on peut percer des trous de petit diamètre tout en conservant localement un rapport d/D suffisant pour que les partiels soient justes. Pour respecter cet impératif le facteur utilise également l'épaisseur de la paroi (de 5 à 6 mm) en agrandissant intérieurement les trous,
- les partiels aigus sortent aisément,
- les partiels ont tendance à être un peu hauts ce qui compense la couverture à l'embouchure et éventuellement la fausseté due aux petits trous.

De plus, devant abaisser légèrement les octaves aiguës on les rend par la même plus douces, ce qui contribue à équilibrer l'instrument, en intensité. Ceci est clairement exprimé par QUANTZ J.J. (Ch. IV § 15) " ... l'intérieur des flûtes doit être construit de façon que les octaves soient un peu trop hautes, afin que quand on veut les entonner aussi net que l'oreille le demande, on soit obligé de jouer les tons bas plus forts et les tons hauts plus faiblement, pour porter les octaves naturellement trop hautes à leur netteté parfaite."

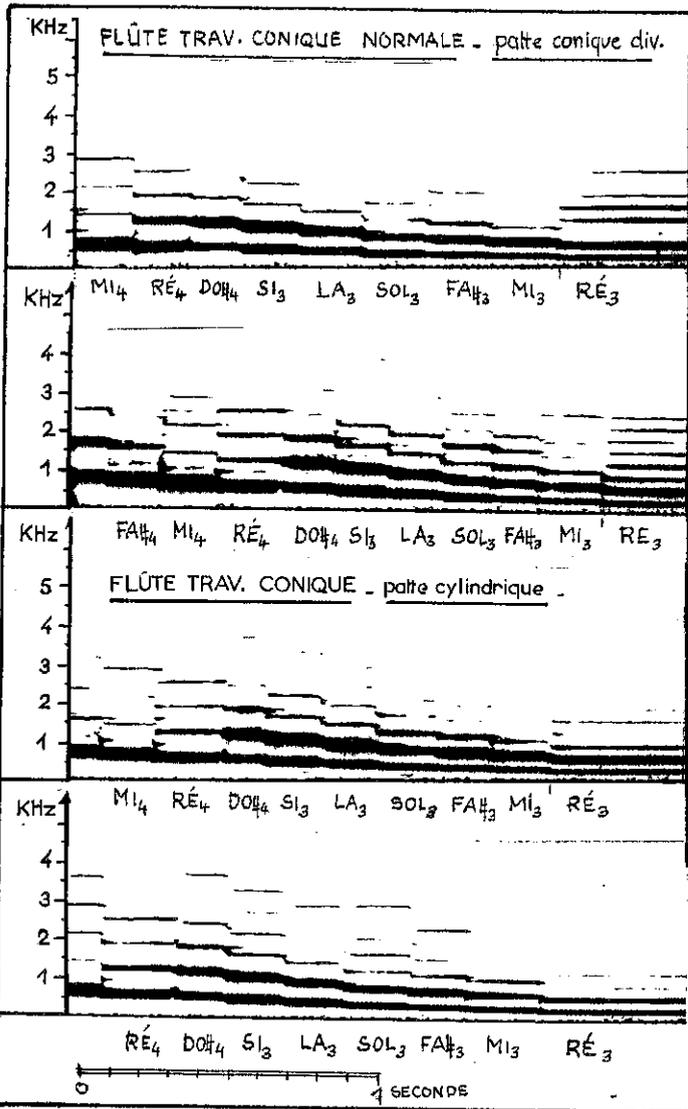
b) Expérience :

Pour connaître l'effet du changement de perce à l'extrémité de l'instrument, remplaçons la patte conique divergente d'une flûte par un tube cylindrique dont le diamètre est celui de l'instrument au raccord, et la longueur telle que le fondamental ait même fréquence. Puis enregistrons dans les mêmes conditions une gamme diatonique descendante sur la flûte munie successivement des deux pattes différentes. Comme le timbre dépend en grande partie des conditions d'excitation à l'embouchure nous avons pris soin de répéter plusieurs fois de suite l'expérience, et nous montrons, fig.109 deux analyses au sonographe pour chaque cas. On voit très clairement que le timbre de la note la plus grave de l'instrument (tous les trous bouchés) est directement affecté par la perce de l'instrument à l'endroit de la patte. Cette note sourde et faible avec une patte cylindrique gagne un grand nombre d'harmoniques avec la patte conique; l'intensité perçue est aussi plus grande.

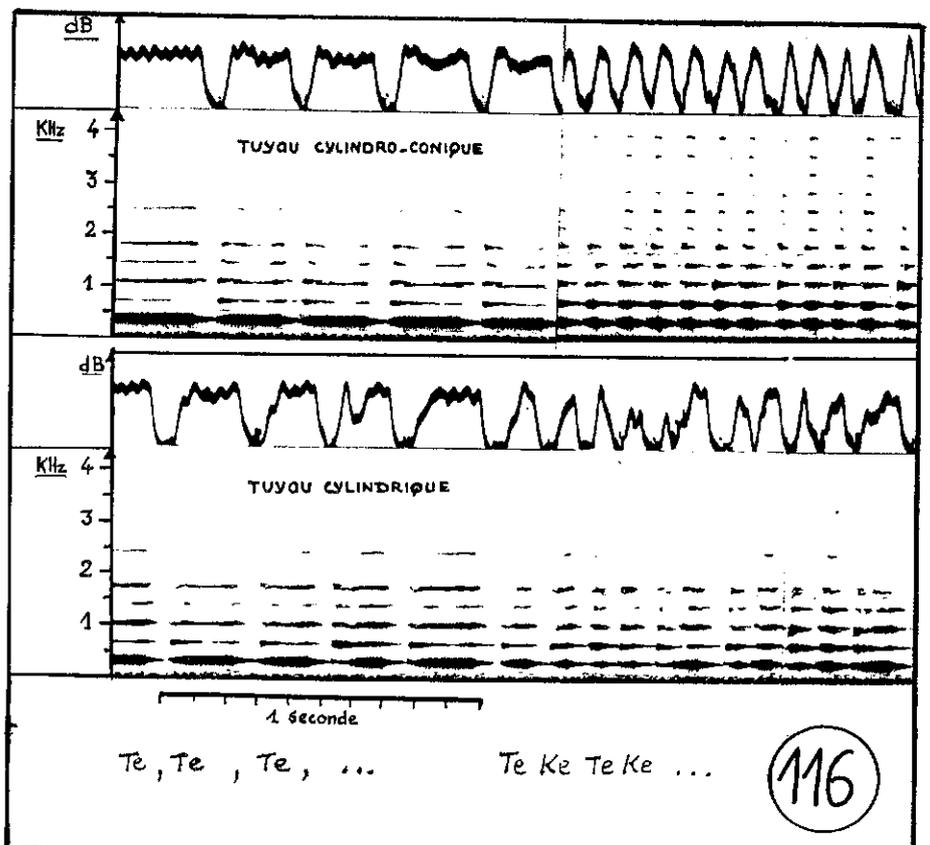
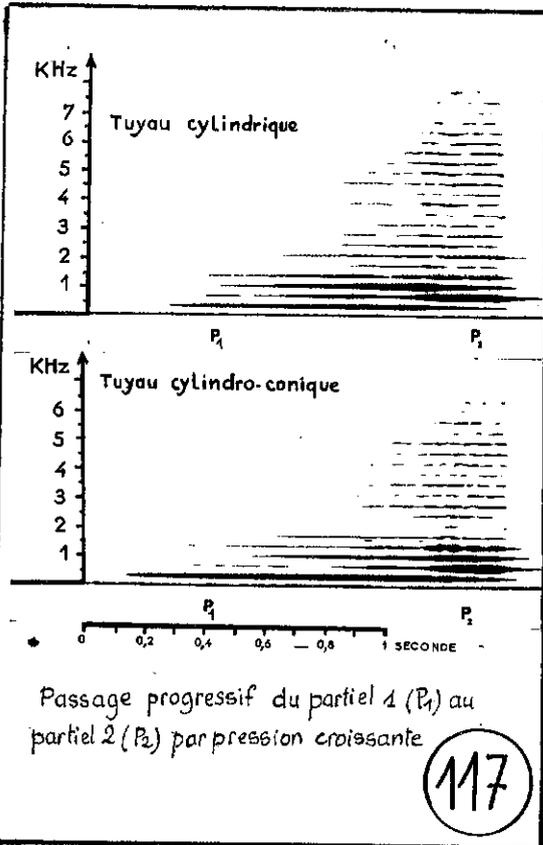
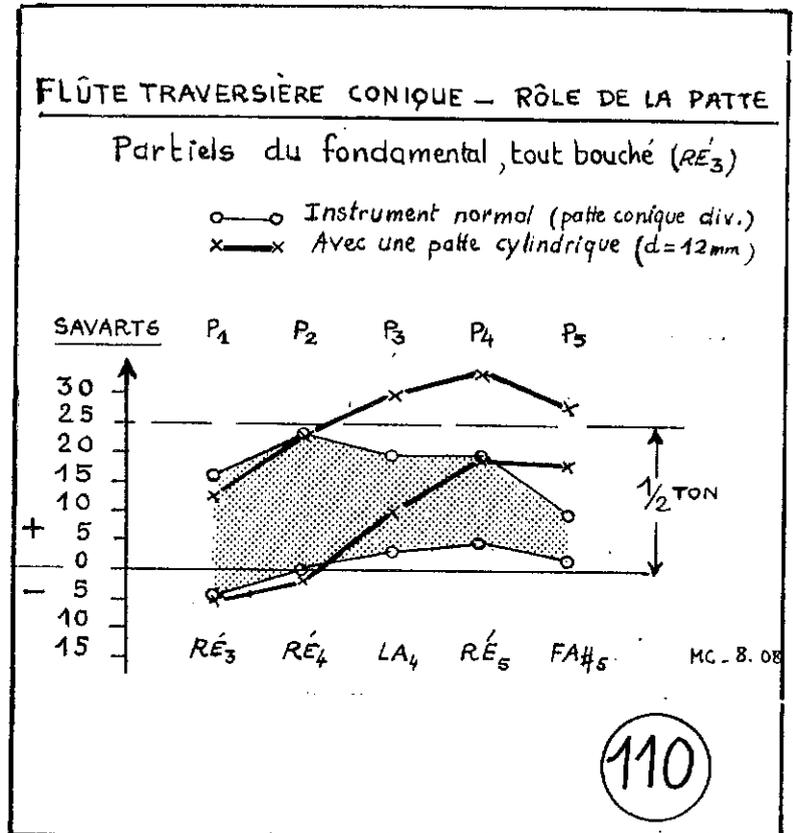
fig.109
Pl.76

Si nous mesurons le champ de liberté des hauteurs des partiels de la note la plus grave de l'instrument dans les deux cas considérés, on constate (fig.110) que la patte conique divergente, en élevant la fréquence des partiels inférieurs (cf. § 3.64) permet aux cinq premiers partiels de rentrer à peu près dans la série harmonique, ce qui explique l'enrichissement du timbre. Avec la patte cylindrique les partiels sont tous beaucoup plus hauts que les harmoniques de $P 1$.

fig.110

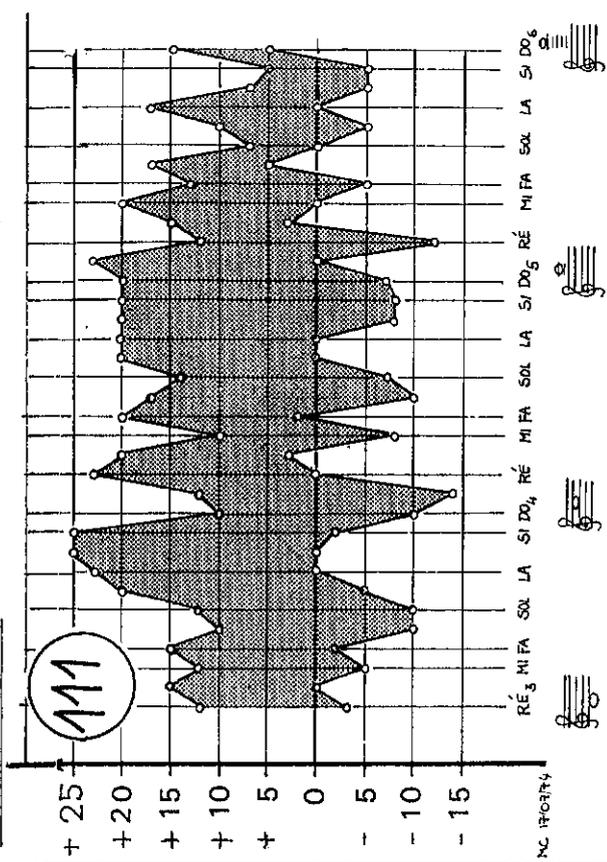


109



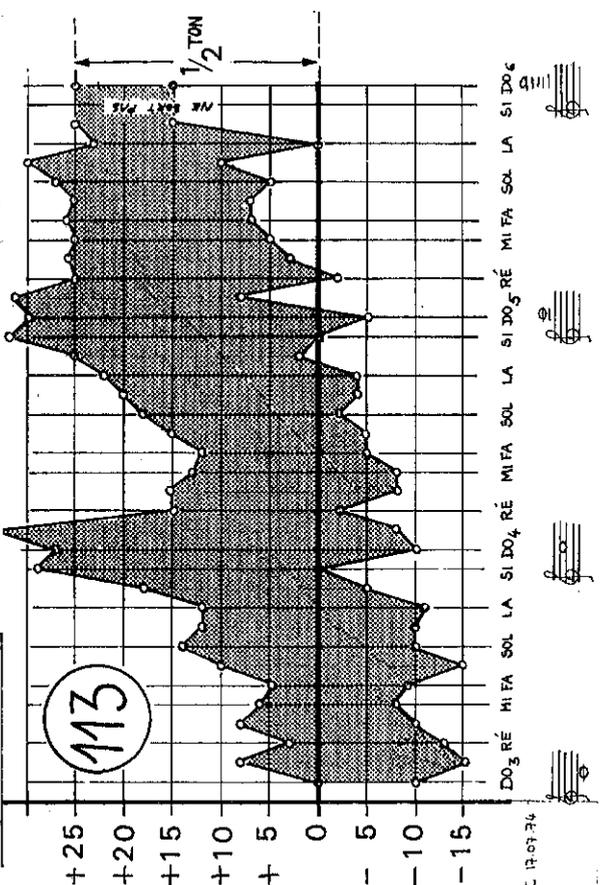
FLÛTE TRAVERSIÈRE (B) - cylindrique système baroque

ECARTS en SAVARTS Référence : Tempérament égal LA₃ = 440Hz

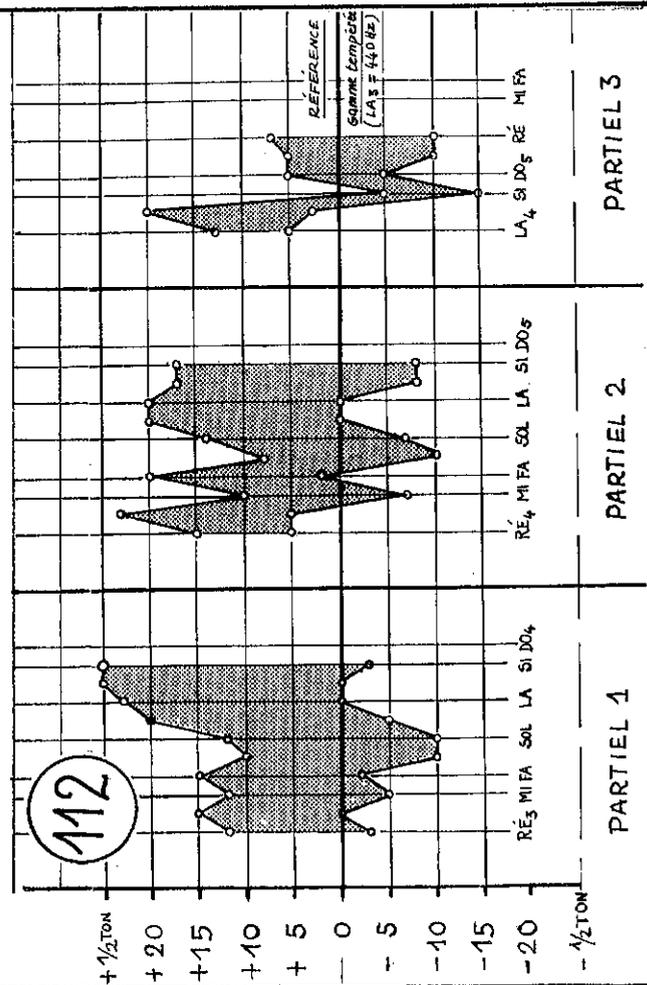


FLÛTE TRAVERSIÈRE (LOT 2331) Conique - système Boehm

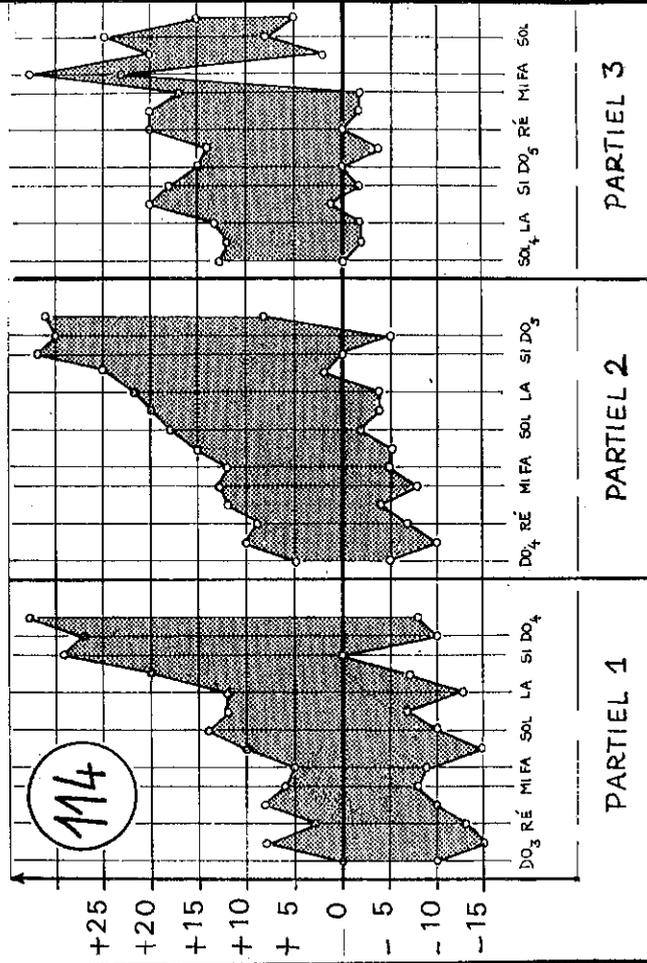
ECARTS en SAVARTS Référence : Tempérament égal LA₃ = 440Hz



ECARTS en SAVARTS Référence : Tempérament égal LA₃ = 440Hz



ECARTS en SAVARTS Référence : Tempérament égal LA₃ = 440Hz



On voit donc que la perce de cet instrument représente un optimum remarquable conciliant à la fois les données anatomiques, musicales et acoustiques. Ce type de flûte s'est d'ailleurs maintenu à peu près inchangé pendant plus de deux siècles; les seules modifications ont consisté dans l'ajout de trous supplémentaires munis de clés, pour éviter les doigtés de fourches. L'évolution du goût et la conception d'une mécanique originale vont permettre, avec BOEHM la mise au point vers 1848 d'un instrument radicalement différent, de perce cylindrique et muni de trous de grand diamètre. Les deux types d'instruments ont longtemps coexisté; leur "croisement" a même donné lieu à deux "monstres" acoustiques qu'il nous semble intéressant de signaler ici.

§ 3.73 - Deux flûtes traversières hybrides

a) Flûte métallique "Beuscher", cylindrique; système de trous baroque.

Cet instrument qui adopte la nouvelle perce mise au point par BOEHM, tête légèrement conique, corps cylindrique, mais conserve le système de trous de l'ancienne flûte, 6 trous et 5 clés, a sans doute été réalisé pour mettre la nouveauté (perce et tube métallique) à la portée des musiciens qui ne voulaient pas changer leur technique de doigtés.

fig.111
Pl. 77

fig.112

Le champ de liberté des hauteurs offre de grandes irrégularités (fig.111) LA3 haut, DO4 bas, RE4 haut, MI4 bas etc... L'aigu, au delà du SOL5 est généralement trop bas. Enfin le timbre est assez pauvre. On le comprend aisément en examinant le relevé des partiels des fondamentaux de l'instrument (fig.112). A partir du MI3 les partiels 2 et 3 sont plus bas que les harmoniques du partiel 1. Au delà du SOL3 le 3ème partiel ne sort plus. Ceci est dû principalement aux trous dont le diamètre est petit par rapport à celui du tuyau.

b) Flûte en bois, Louis LOT, système BOEHM, perce baroque.

Ce bel instrument représente l'essai inverse : adaptation du nouveau système de trous et de la mécanique BOEHM sur le tube traditionnel, conique. Il est le résultat des premiers essais de BOEHM (1832) dans la conception d'une nouvelle flûte. Le compromis est presque viable d'autant que l'instrument sonne bien. Mais l'aigu est tout de même trop haut, comme on peut le constater sur le champ de liberté de la fig. 113. On pouvait s'attendre à ce résultat puisque les trous étant très grands n'abaissent que très peu les partiels et que la perce conique les élève. On retrouve sur cet instrument un défaut courant des flûtes traversières système BOEHM : l'allure ascendante du champ de liberté des fondamentaux, avec une rupture au changement de registre, de DO \sharp 4 à RE4. Mais dans la plupart des cas ce défaut vient de ce que la flûte a été coupée au raccord tête-corps pour l'amener à un diapason plus élevé. Ce fut peut-être le cas pour cet instrument aussi : nous n'avons pas les éléments pour en décider. Le relevé des partiels (fig.114) montre encore plus clairement le phénomène.

fig.113

fig.114

Nous voyons une fois de plus combien il est difficile de résoudre le délicat problème de l'adaptation réciproque de la perce des trous à celle du tuyau, pour obtenir une configuration donnée des partiels. A cet égard il semble qu'il soit souhaitable que les partiels soient légèrement plus hauts que les harmoniques du P 1 (plutôt que l'inverse) ce qui favorise l'émission de partiels élevés et permet un timbre plus riche.

§ 3.74 - La flûte à bec baroque (alto)

fig 107 et
115, Pl 75

La taille de l'instrument est dans l'ensemble plus grosse que celle de la flûte traversière (fig. 107 et 115). Comme dans cette dernière la tête est cylindrique et le corps conique convergent mais avec une diminution caractéristique du diamètre entre le 1er et le 2ème trou. A l'inverse de la flûte traversière, la patte continue le cône convergent. Il en résulte que l'instrument, tous les trous étant bouché (son le plus grave, FA3) n'octavie pas juste. L'intervalle P1/P2 dépasse l'octave de près d'un demi-ton. On peut s'interroger sur cette particularité; nous proposons les raisons suivantes :

1) Avec 8 trous les fondamentaux de l'instrument couvrent un intervalle légèrement supérieur à la neuvième (octave + ton). On n'a donc pas besoin du partiel 2 du FA3 pour faire le FA4; on obtient celui-ci par un doigté de fourche. Par contre, on utilise le partiel 2 du FA4, élevé par l'ouverture du 8ème trou pour produire le SOL4 qui étant en régime 2, pourra s'enchaîner sans " clics " avec les notes supérieures, (principalement le LA4 que l'on obtient en débouchant le 3ème trou pour triller). L'ajustement correct de ces sons est d'ailleurs difficile à réaliser.

2) Le bec de l'instrument doit fonctionner sur toute l'étendue, des plus faibles aux plus fortes pressions et donner dans tous les cas une attaque précise. Pour le son le plus grave de la flûte alto la pression est très basse, de l'ordre de 5 à 10 mm d'eau. Or il est difficile de contrôler le souffle pour ces valeurs. Il est souhaitable que les zones de pression des partiels soient bien distinctes. Or quand les partiels 1 et 2 sont à l'octave l'un de l'autre il existe souvent une zone de pression intermédiaire entre les deux régimes, dans laquelle les deux partiels coexistent. Dans cette zone l'attaque est mauvaise car il s'établit des échanges d'énergie entre les deux partiels avant que l'un ou l'autre ne l'emporte. Au contraire, quand les partiels sont très différents de l'octave l'attaque peut être plus précise. C'est du moins ce qui nous est apparu lors de l'expérience suivante.

fig.116
planche
76

- Expérience : Nous avons raccordé à la tête cylindrique d'une flûte à bec baroque un tube également cylindrique, de même diamètre et dont la longueur permettait d'obtenir le même fondamental que l'instrument normal. Les analyses au sonographe montrent (fig.116) indépendamment de la modification de timbre, qu'en jeu détaché l'attaque est nette et régulière avec la flûte normale cylindro-conique. On peut répéter la même note avec rapidité, en double coup de langue. Avec la flûte entièrement cylindrique, l'attaque est peu sûre et commence souvent sur l'octave. Tout ceci se lit aussi clairement sur la courbe de niveau. Or dans les deux cas nous utilisons la même bouche; c'est bien le rapport de justesse des partiels qui détermine le phénomène. On voit d'ailleurs, fig.117 le passage du premier au deuxième partiel, par pression continuellement croissante. Avec le tuyau cylindrique le passage se fait très graduellement; les harmoniques 2, 3 et 4 devenant plus intenses bien avant le passage proprement dit, alors qu'avec le tuyau cylindro-conique, on constate un véritable saut.

fig.117

3) Expérience - Remplaçons la patte conique convergente de l'instrument par un tube cylindrique du même diamètre que celui de la flûte à l'endroit du raccord (13 mm) et ajustons sa longueur pour obtenir le même fondamental. L'instrument est plus long de 20 mm. Perçons sur cette patte cylindrique de même épaisseur (6 mm), le trou double du SOL3 (1er trou) à même distance du raccord que précédemment.

En jouant nous constatons que les premières notes graves sont plus intenses et plus timbrées que sur l'instrument normal, mais que l'aigu est instable et faux : MI5 est trop bas et FA5 quasi-impossible à émettre. Ces deux notes dépendent du partiel 3 du SOL3, or, avec la patte cylindrique nous constatons que ce partiel est trop bas (environ DO#5) et aucune combinaison de doigtés ne permet de le monter au MI5, à fortiori au FA5. Le partiel suivant, FA#5 est inutilisable pour ces deux notes.

...../

Nous avons constaté les mêmes " défauts " sur une flûte alto moderne type " Renaissance ", de plus grosse perce (20 mm au bec), de faible conicité (17 mm au plus petit diamètre) et dont la patte est quasi cylindrique. La tessiture de cet instrument s'arrête au RE5 d'ailleurs un peu bas et d'attaque problématique. La contre-expérience qui a consisté à introduire un tube dans la patte pour en réduire le diamètre à 14 mm jusqu'au niveau du 2ème trou a été concluante; instantanément il est devenu possible de jouer MIB5, MI5, FA5 avec une justesse assez étonnante.

Le changement de conicité de la patte de la flûte à bec baroque aurait donc pour rôle essentiel de faciliter l'émission du partiel 3 des sons graves de l'instrument et de l'ajuster pour compléter l'étendue de la flûte à deux octaves, ceci au détriment des premiers sons graves de l'instrument qui perdent en intensité et en sonorité.

Il est impossible de savoir quelle fut la part de hasard dans la mise au point de la perce de cet instrument mais on ne peut qu'être plein d'admiration devant le résultat, tant le problème à résoudre est complexe. Les paramètres sont nombreux, étroitement liés et il faut concilier à la fois des impératifs forts divers : musicaux, anatomiques, acoustiques, trouver un compromis entre la justesse, la sonorité, la facilité de jeu. D'autres solutions existent peut-être mais on comprend que les facteurs d'aujourd'hui se contentent pour l'instant de copier au mieux les instruments qui existent.

Chap. VI - LE ROLE DU MATERIAU§ 3.75 - Généralités

Les flûtes sont fabriquées de matériaux très divers. Les raisons fondamentales en sont le plus souvent d'ordre pratique : les hommes ont d'abord utilisé les tuyaux naturellement creux qu'ils avaient à leur disposition : os, roseau, avant de fabriquer des tubes de métal ou de tourner le bois ou l'ivoire. En ce qui concerne l'orgue, le double impératif d'un matériau rigide mais suffisamment déformable pour permettre l'harmonisation a conduit à l'utilisation de l'étain, et si DOM BEDOS s'élève contre l'emploi d'étoffe pour certains jeux et pour les pieds des tuyaux, c'est pour des raisons de tenue dans le temps, le plomb subissant des altérations (lèpre) et favorisant la déformation des tuyaux (DOM BEDOS art. 157 p.43).

On trouve dans les écrits des facteurs et des musiciens un grand nombre d'affirmations concernant le rôle du matériau sur la sonorité : le bois donne un son doux, le métal est plus sonore etc.. On peut par exemple consulter ROCKSTRO qui y consacre plusieurs paragraphes (§ 311 à 319) ou BOEHM (bib (2) chap. IV). La plupart des scientifiques concluent à l'opposé que le matériau n'a aucune influence sur le son : " une flûte d'argent et une flûte de bois ont exactement la même qualité de son " affirme BOUASSE (bib (2) TR § 113).

En fait, l'expérimentation en ce domaine est très difficile car le timbre des sons de deux tuyaux de même forme géométrique est déterminé en grande partie, disons à 98 %, par le système excitateur. Il faut donc au préalable distinguer les instruments à bec (tuyau d'orgue, flûte à bec) où le matériau peut jouer un rôle au niveau du système excitateur, des autres, à embouchure réglable, où les variations de timbre sont produites par le musicien.

En ce qui concerne le tuyau proprement dit nous examinerons le rôle de la vibration des parois et l'état de surface interne du tube.

§ 3.76 - Rôle acoustique du matériau au niveau de la bouchea) Etat de surface, structure microscopique du matériau.

Lorsque les dimensions de la bouche sont petites, l'état de surface du matériau peut jouer un rôle important selon qu'il est lisse (métal, plastique) granuleux (terre, certains bois) ou hérissé de fibres orientées en tous sens.

Au niveau de la lumière l'état des arêtes intervient sur la diffusion du jet et la proportion de bruit dans le son du tuyau.

Au biseau la nature du matériau impose l'épaisseur minimale de la paroi de même que la netteté de son bord. Nous avons fait l'expérience suivante pour montrer l'importance de l'état du biseau.

- Expérience : Prenons trois tuyaux d'orgue à bouche, en métal, dont nous enregistrons le son en jouant chacun d'eux plusieurs fois de suite, puis appliquons avec précaution sur le biseau (lèvre supérieure) une bande de tissu adhésif et enregistrons le son des tuyaux ainsi modifiés. On note à l'oreille un changement important

fig.118
PL. 78

dans la sonorité, ce que montrent bien les analyses au sonagramme (fig.118). Après application du tissu les trois tuyaux ont tendance à octavier : l'attaque se fait nettement sur l'harmonique 2, dont l'intensité est renforcée. Dans l'ensemble les harmoniques aigus (supérieurs à 4000 Hz) sont affaiblis par le tissu, mais c'est surtout dans la composition de l'attaque que l'on note le plus de changement : les bruits d'Os au son de bouche, bruits d'écoulement, partiel d'attaque, sont considérablement atténués.

La diminution des bruits et le renforcement de l'harmonique 2 font que le son des 3 tuyaux semble plus " clair " après la pose du tissu sur la lèvre supérieure. Malheureusement l'expérience ne permet pas de séparer les modifications qui sont dues au changement de l'état de surface, de celles qui sont produites par l'épaississement du biseau. Cependant, lors d'une expérience faite avec le système lame d'air-biseau isolé (cf. § 2.06) nous avons constaté que le fait d'augmenter l'épaisseur du biseau atténuait l'intensité des composantes aiguës du son de bouche et favorisait l'établissement du régime 2. On peut donc avancer que le changement d'état de surface de la lèvre est plutôt responsable de l'atténuation des bruits de bouche.

b) Modifications du matériau sous l'action de l'humidité.

Rappelons l'importance de ce problème dans l'étude des flûtes et en particulier des flûtes à bec. En absorbant l'humidité du souffle du musicien, le matériau peut se déformer et son état de surface se transformer. Si le matériau est imperméable à l'eau il se produit un dépôt de gouttelettes dans le canal des flûtes à bec et aux chanfreins de la lumière. Nous avons étudié quelques uns de ces problèmes au § 2.42 et montré les modifications notables du timbre que l'on peut observer.

En résumé le matériau dont est faite une flûte à bec ou un tuyau d'orgue joue certainement un rôle sur le timbre, au niveau de la bouche. Si l'on peut assez bien expliquer des différences entre deux matériaux d'aspect et de comportement différents comme le bois et le métal, ou le bois et le plastique, il semble à peu près exclu d'espérer mettre en évidence des différences entre des matériaux voisins. L'impossibilité pratique de construire deux bouches parfaitement identiques interdit l'expérimentation : les variations provenant des différences dimensionnelles qui échappent à l'observation et à la mesure risquent d'être largement supérieures à celles qui pourraient provenir du matériau.

§ 3.77 - Vibration des parois

Il est d'expérience courante de percevoir par le toucher la vibration des parois d'un tuyau d'orgue ou d'une flûte en cours de fonctionnement. En plaçant un accéléromètre sur le tuyau on peut capter cette vibration de la paroi solide et constater que sa composition spectrale varie avec la nature du matériau. La question qui nous importe est de mettre en évidence la part qui revient à la vibration des parois, dans le son émis par le tuyau.

Lorsque les parois sont très minces les phénomènes sont nets. En 1825 SAVART (Bib. p. 73) fait une série d'expériences avec des tuyaux de section carrée comportant une ou plusieurs parois de papiers d'épaisseurs variées, et montre que la fréquence émise par le tuyau baisse d'autant plus que l'épaisseur et la tension de la paroi sont plus faibles; pour un tuyau donné elle peut varier selon l'endroit où on immobilise le tuyau. Il montre également que, toutes choses égales, un tuyau cylindrique vibre beaucoup moins qu'un tuyau carré ou rectangulaire. De telles expériences ont été reprises par un grand nombre d'auteurs; elles sont relatées dans les articles de BONER et NEWMAN (1940) et BACKUS et HUNDLEY (1966).

...../

fig.119 Nous avons fait une expérience simple pour montrer plus particulièrement les modifications spectrales produites par la vibration des parois de papier. Prenons un tuyau d'orgue cylindrique en étain qui parle bien et enregistrons le son. Puis, ayant coupé le corps à 15 mm au dessus de la bouche de façon à conserver la lèvres supérieure en étain nous le remplaçons par un cylindre en papier de mêmes dimensions intérieures. En accord avec SAVART nous constatons que le son du tuyau a baissé, (de $La\sharp 3 + 10$ sav. à $La\flat - 7$ s.) et change selon l'endroit où on saisit le tuyau. On obtient même par moment l'octave inférieure $LA2$. L'analyse du son au sonographe montre d'importantes modifications de timbre (fig.119). Le son du tuyau s'établit difficilement : le transitoire dure environ 50 ms, pendant lesquelles les composantes aiguës du son de bouche sont très intenses alors que l'amplitude du fondamental ne croît que très graduellement. La composition harmonique du son du tuyau de papier est pauvre on note la disparition des harmoniques pairs et le remplacement des harmoniques aigus par des bruits d'écoulement dus au son de bouche.

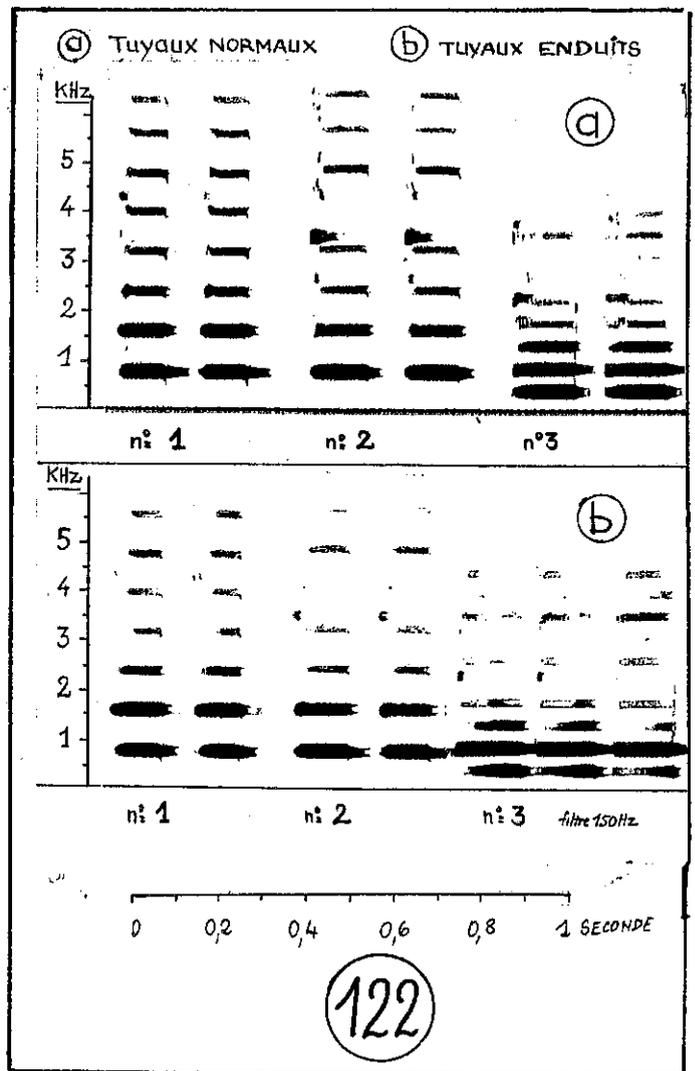
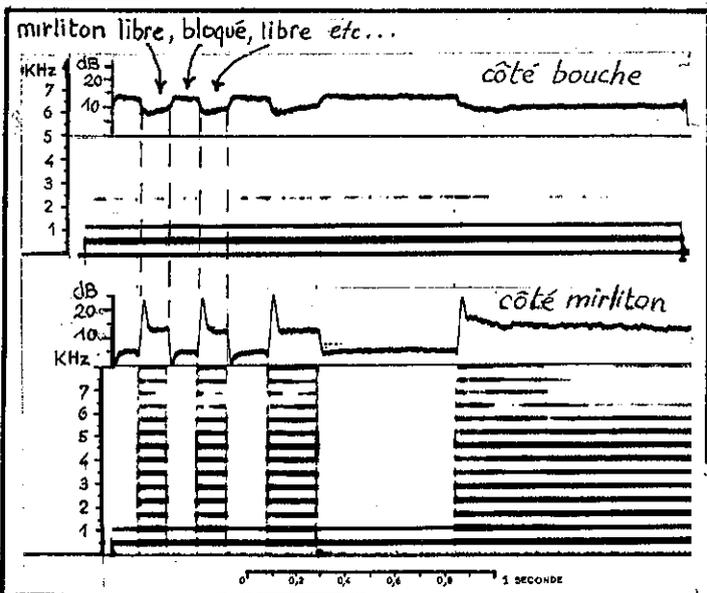
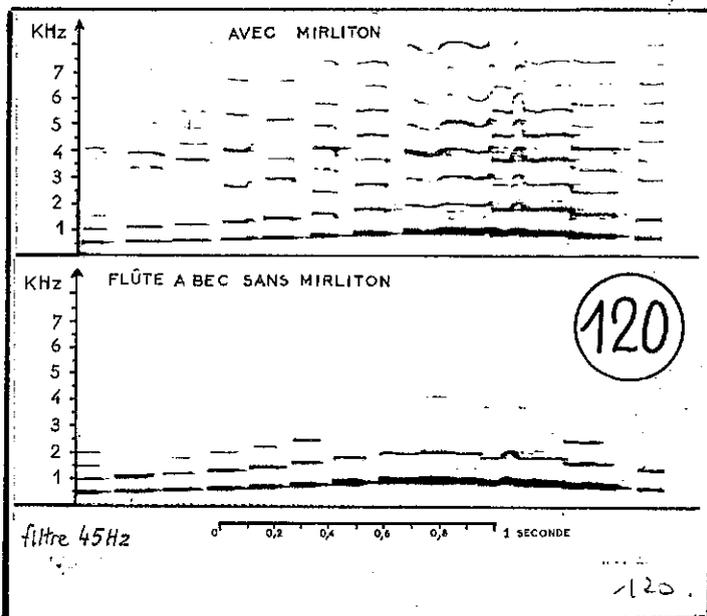
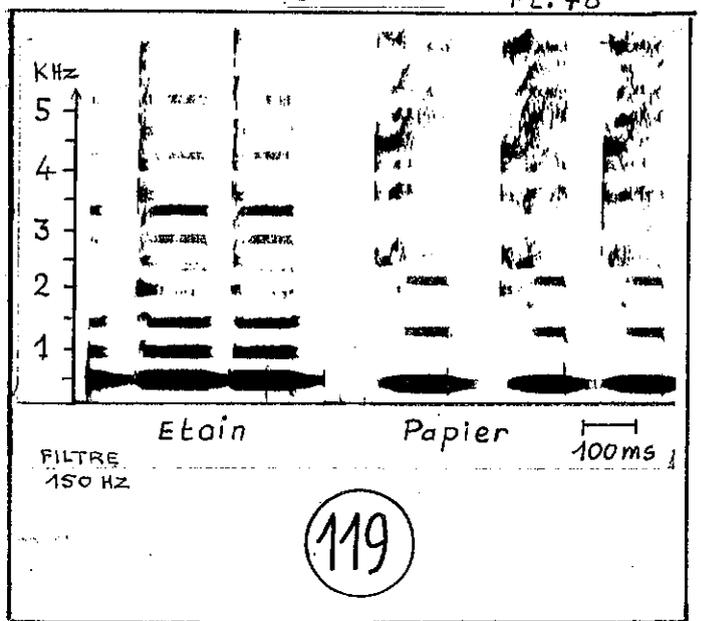
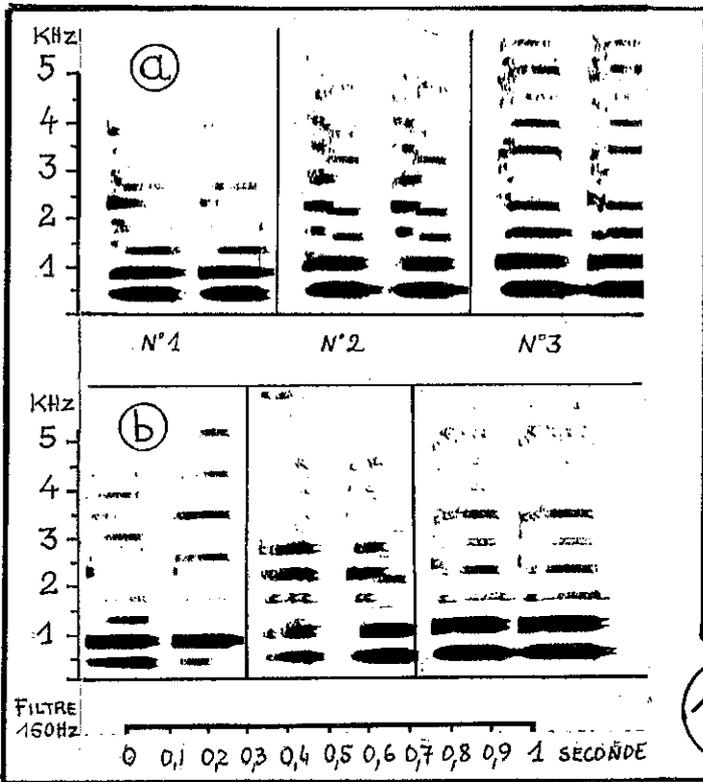
En résumé, un tuyau dont les parois sont très flexibles fonctionne mal. Les vibrations des parois réagissent sur l'onde stationnaire interne dont elles gênent l'établissement, d'où la durée du transitoire d'attaque et l'affaiblissement des harmoniques pairs qui ont un noeud de pression situé au milieu du tuyau, correspondant à un maximum de la vibration transversale des parois. BONER et NEWMAN notent également pour le tuyau de papier, la chute des harmoniques 2 et 4. Enfin la paroi vibrant comme une membrane se comporte comme une source : les mêmes auteurs citent le cas d'un tuyau de cuivre dont la paroi, épaisse de 0,127 mm continue à vibrer pendant une à deux secondes après l'arrêt de la soufflerie, en rendant un son similaire à celui que l'on obtient en percutant la paroi avec le doigt.

Les tuyaux des instruments réels sont construits de façon à être suffisamment rigides pour ne pas gêner l'onde stationnaire interne. Il devient alors très difficile de mettre en évidence le rôle possible de la vibration des parois dans le son émis par le tuyau.

Connaissant l'importance des variables dues à la bouche nous ne pouvons retenir les expériences qui comparent le son de plusieurs tuyaux construits dans divers matériaux (cf. LOTTERMOSE et MEYER p.41). La méthode employée par les auteurs américains consiste à utiliser, comme nous l'avons fait pour le tuyau de papier, le pied et la bouche d'un tuyau d'orgue en étain que l'on coupe à quelques cm au dessus du fond. A l'aide d'une bague de raccordement on peut remplacer le corps original par des cylindres de divers matériaux. On peut toutefois mettre en doute le mode de liaison mécanique entre le tube et la bouche lorsque les phénomènes à déceler sont de faible amplitude. Les modalités de la prise de son prennent aussi beaucoup d'importance comme le signalent BONER et NEWMAN. Ces auteurs concluent que le matériau du cylindre situé au dessus de la lèvres supérieure d'un tuyau à bouche a très peu d'influence sur la composition spectrale du son stationnaire du tuyau.

Au terme d'une étude théorique montrant que la puissance sonore rayonnée par les parois flexibles d'un tube est liée directement au changement de fréquence qu'elles produisent dans l'onde stationnaire interne, BACKUS et HUNDLEY posent que si le changement de fréquence constaté sur un tuyau dont on immobilise les parois flexibles est inférieur à 1 cent soit environ $0,5/1000$ de la fréquence, on pourra en conclure que le rayonnement dû aux vibrations des parois est plus faible de 60 dB que le son émis par la bouche, donc négligeable.

D'une expérience faite avec un tuyau à doubles parois dans l'intervalle desquelles on peut verser de l'eau ils constatent que celle-ci ne produit aucun changement de fréquence notable. Les parois des tuyaux d'orgues traditionnels vibrent, comme on peut le constater par des relevés faits à l'accéléromètre, mais puisque l'expérience ne montre pas d'effet sur l'onde stationnaire il faudrait en conclure que celle-ci n'en est pas la cause. Les auteurs arrivent à la conclusion que les vibrations des parois sont dues aux forces exercées par le jet d'air, sur la lèvres supérieure.



121

Quoi qu'il en soit, le rôle de la vibration du tube sur le son émis par un tuyau à bouche, sans être sûrement négatif, n'a pu être mis en évidence par les auteurs. Il resterait à expérimenter en régime transitoire. L'essai tenté par BACKUS n'est pas convaincant car l'analyse a été faite à l'oscillographe où l'on voit mal les phénomènes de haute fréquence.

§ 3.78 - Affaiblissement local de la paroi : le mirliton.

fig.120b Prenons une flûte à bec à 6 trous avec laquelle nous enregistrons une petite mélodie (fig.120b) puis perçons entre l'embouchure et le dernier trou, environ au 1/6 de la longueur acoustique, un trou supplémentaire de diamètre 6 mm, que nous recouvrons d'une fine membrane (papier à cigarette, pellicule plastique ou " moelle " de bambou) bouchant hermétiquement le trou. Pour un réglage convenable de la tension la membrane vibre et le son de la flûte en est complètement transformé :

fig.120a - on voit apparaître sur le sonagramme un très grand nombre d'harmoniques qui peuvent dépasser 8000 Hz (fig.120a) au point que la flûte peut passer pour un instrument à anche.

- la flûte munie du mirliton est d'une intensité beaucoup plus grande à l'oreille, alors que le décibelmètre ne montre pas de variation sensible, que le mirliton fonctionne ou non. Une partie de l'énergie concentrée dans le fondamental se trouve répartie dans les harmoniques aigus, dont certains, situés dans la zone sensible de l'oreille (\approx 3000 à 4000 Hz) contribuent à accroître l'intensité perçue. De plus, les harmoniques étant plus nombreux la flûte émerge beaucoup mieux d'un ensemble instrumental.

fig.121 Nous avons voulu savoir si la membrane vibrante située à peu de distance de la bouche réagissait sur le fonctionnement de celle-ci. Dans ce but, nous avons isolé les deux parties à l'aide d'un grand écran, et placé un micro à quelques cm de chaque source. L'enregistrement sur magnétophone stéréophonique d'une séquence pendant laquelle on bloque à plusieurs reprises la vibration du mirliton est analysée sur la fig.121.

- près du mirliton-libre : on enregistre un son riche en harmoniques.
 - bloqué: le micro capte une partie du son de la bouche l'isolement n'étant pas parfait.
- près de la bouche : que le mirliton fonctionne ou non on ne note pas de différence très importante, sinon un léger enrichissement du son lorsque le mirliton est bloqué. Effectivement, la courbe d'intensité montre que l'énergie rayonnée à la bouche chute d'environ 6dB quand la membrane vibre.

La fréquence du tuyau baisse de 3 savarts.

Placée en général au 1/6 du tuyau de façon à être proche d'un ventre de pression pour tous les sons du tuyau, la membrane du mirliton se comporte donc comme une source riche en harmoniques fonctionnant aux dépens de la bouche et modifiant simultanément le timbre et l'intensité perçue de l'instrument. L'emploi du mirliton est courant en Asie (Chine, Japon) sur les flûtes traversières ou à encoche. Les musiciens le règlent de telle sorte qu'ils peuvent, selon la force du jeu, solliciter plus ou moins fortement le fonctionnement de la membrane, donc régler l'enrichissement du son.

Signalons que la tentative d'adaptation à un instrument occidental par SUDRE n'a pas eu de succès (cf. Sudrophone; bib. LAVIGNAC p. 760).

§ 3.79 - Etat de surface interne du tuyau

Dans la construction des flûtes, les matériaux dont le grain permet un beau polissage sont recherchés (buis, ébène, ivoire). Il ne s'agit pas seulement de l'aspect extérieur de l'instrument puisque l'intérieur du tube est poli avec autant de soin. Certaines flûtes sont mêmes vernies ou laquées intérieurement (Japon, Chine).

On peut expliquer de la même façon le fait qu'un joueur de ney Turc passe son instrument sous le robinet pendant plusieurs minutes avant de jouer : le roseau étant enduit intérieurement de suif pour prévenir le dessèchement, il se forme un film d'eau qui améliore le poli interne, donc le rendement de l'instrument. Un musicien occidental nous a confirmé également que la flûte en bois (à 1 clé) sonne mieux, au bout de 10 à 15 mn de jeu, lorsqu'elle est bien mouillée.

Pour mettre en évidence le rôle de l'état de surface des parois intérieures nous avons fait l'expérience suivante.

- Expérience : Prenons 3 tuyaux d'orgue en étain, de taille moyenne de longueur comprise entre 20 et 30 cm, que nous plaçons sur le sommier expérimental. Nous enregistrons le son de ces tuyaux, puis nous enduisons l'intérieur de chacun d'eux d'une colle de farine permettant de retenir sur les parois la poudre de liège que nous projetons à l'intérieur. Toutes les précautions sont prises pour ne rien modifier à la bouche pendant ces opérations. On peut d'ailleurs après lavage des tuyaux s'assurer que l'on est bien revenu au son original. L'enduit étant volontairement très conséquent les résultats sont nets.

- intensité : le son des tuyaux est plus faible d'environ 5 dB.
- fréquence : le fondamental des tuyaux est abaissé de 5 à 10 savarts. Le fait que le diamètre intérieur soit légèrement réduit par l'enduit peut intervenir dans ce résultat, toutefois cette variation est en accord avec la pratique des facteurs d'orgue (Bib. M. CASTELLENGO (7) p. 32).
- timbre : l'examen des sonagrammes des tuyaux avant et après enduit montre d'importantes modifications provoquées par l'augmentation de l'amortissement intérieur (fig.122). On note un affaiblissement des harmoniques aigus et une augmentation importante du bruit de souffle dans la même zone. Pour les tuyaux 1 et 2 le fondamental est atténué au profit de l'harmonique 2. Enfin le transitoire d'attaque est plus bref et plus net pour les tuyaux 1 et 3 et au contraire plus long pour le tuyau N° 2.

fig 122

Par l'état de surface interne qu'il détermine le matériau peu donc jouer un rôle dans le fonctionnement des tuyaux à bouche. Toutefois ce rôle est le plus souvent négligeable devant les autres variables, surtout dans les instruments à embouchure réglable.

§ 3.80 - Conclusion

Dans la discussion entre musiciens, facteurs et scientifiques le rôle possible de la nature du matériau des flûtes revient très fréquemment. Ce n'est que lorsqu'on connaît avec certitude la part des autres variables que l'on peut étudier celle du matériau, c'est pourquoi nous avons placé ce chapitre au terme de l'étude expérimentale. Si les expériences que nous avons faites sont souvent grossières par rapport à la réalité, c'est dans le but de montrer dans quel sens peuvent se produire les modifications dues au matériau. Nous avons vu également l'intérêt que présente l'analyse des transitoires d'attaque, un point que la plupart des auteurs négligent. Les difficultés que l'on rencontre pour mettre en évidence le rôle du matériau dans

...../

les conditions réelles, et l'existence de très nombreuses variables corrélatives, souvent négligées, expliquent que les discussions entre spécialistes ne puissent être tranchées simplement.

Au niveau de la bouche le matériau joue certainement un rôle important pour les instruments à bec, mais devant l'impossibilité pratique d'expérimenter nous en sommes réduits à des conjectures. En tous cas, lorsqu'on connaît l'importance des variables de la bouche, on peut ramener à leur juste valeur certaines affirmations publicitaires de facteurs de flûtes à bec concernant les "qualités" sonores des matériaux utilisés (palissandre, poirier, plastique) alors que ce qui est en cause ce sont les bords des instruments considérés, réglés différemment (débit, forme de la lumière, direction jet/biseau). Quant au tube, son rôle est de permettre l'établissement de l'onde stationnaire interne sans la gêner par la vibration des parois ni par une trop grande rugosité : les matières plastiques conviennent parfaitement ^{pour} remplir ce rôle.

Mais nous touchons là un point important qui entre pour une grande part dans le jugement du musicien : c'est le rôle psychologique que joue le matériau par l'agrément qu'il procure au toucher ou à la vue, ou parce qu'il est un matériau précieux (or, ivoire...). Objectivement un musicien joue mieux sur une flûte qu'il aime : c'est un paramètre non négligeable.



4ème PARTIE

INSTRUMENTS DE MUSIQUE A EMBOUCHURE DE FLÛTE



4ème PARTIE

INSTRUMENTS DE MUSIQUE A EMBOUCHURE DE FLUTE

CHAPITRE I

CLASSIFICATION DES INSTRUMENTS

A EMBOUCHURE DE FLUTE

§ 4.01 - Généralités

Le nombre et la diversité des flûtes jouées par les hommes nous amène à poser le problème de leur classification.

Il s'agit de définir des groupes représentés par des types définis, groupes auxquels on devrait pouvoir rattacher tout nouvel instrument. Il est bien évident que l'on peut classer selon différents points de vue, suivant que l'on s'intéresse à la facture de l'instrument, à son utilisation musicale, à son rôle culturel etc.. Dans ce travail, notre propos est d'examiner les flûtes du point de vue de leurs possibilités acoustiques : les détails de facture ou de jeu n'étant pris en compte que dans la mesure où ils ont une incidence sur le résultat sonore. Il pourra arriver ainsi que des instruments d'aspects différents appartenant à des populations très éloignées se retrouvent, du point de vue qui nous intéresse ici, dans le même groupe.

Au terme de cette étude nous pouvons espérer disposer de critères acoustiques assez bien définis. Le problème consiste à établir une hiérarchie entre ces critères.

§ 4.02 - Classifications existantes1) MAHILLON (1880)

Conservateur en chef du Musée Instrumental de Bruxelles, MAHILLON entreprend dès 1893 un catalogue descriptif de tous les instruments qui entrent au musée. Avec le premier volume il propose une classification des instruments fondée sur " la nature différente des corps employés comme source sonore ". Au fur et à mesure que de nouveaux instruments entrent au Musée le catalogue s'agrandit; il comporte 5 volumes dont le dernier paraît en 1922. Dès le 4ème volume MAHILLON modifie et complète la classification afin de pouvoir introduire certains instruments extra-européens de type nouveau. Il est significatif de noter que seule la classification des instruments à vent a été remaniée.

Cette classe est divisée en 4 branches : instruments à anche; instruments à bouche; instruments polyphones à réservoir d'air; instruments à embouchure. L'orgue est ainsi placé d'emblée dans une classe spéciale.

Les instruments à bouche comprennent 3 sections.

- a) bouche biseautée
- b) bouche latérale
- c) bouche transversale.

elles-mêmes subdivisées en sous-sections selon que le tuyau est ouvert ou fermé; pour les sections a) et c) est prévue également la sous-section : "récipient".

Cette classification, la première en date, reste en ce qui concerne les bouches assez sommaire. Les résonateurs, dont le fonctionnement est différent de celui des tuyaux ne sont pas séparés de ceux-ci, et la distinction entre tuyau ouvert et tuyau fermé n'intervient qu'en dernier lieu.

- 2) En 1914 - HORNBOSTEL et C. SACHS élaborent un système de classification des instruments de musique qui se veut exhaustif et universel, devant permettre d'inclure n'importe quel type d'instrument. Il est, aujourd'hui encore, assez fréquemment utilisé, bien que présentant, en ce qui concerne les flûtes, des défauts sérieux. Sur la figure 1 nous avons représenté la famille des flûtes sous forme d'un arbre renversé.

fig. 1
Pl. 79

Le système utilise la classification numérique décimale à 9 colonnes, fort commode pour l'archivage des instruments et qui possède l'avantage d'être un système ouvert. Examinons les critères retenus dans l'ordre des colonnes. (On lit les chiffres de gauche à droite) :

- 1er chiffre : sépare les aérophones ou instruments à vent des idiophones, membranophones et cordophones.
- 2ème " : distingue les instruments à vent proprement dits, utilisant une cavité, de tous les autres moyens de produire un son par une source aérienne.
- 3ème " : sépare les instruments à bouche des anches et des instruments à embouchure.
- 4ème " : a trait à l'excitation et sépare les flûtes à conduit des autres. voir figure 1
- 5ème " : - divise les flûtes sans conduit selon que l'instrument est excité transversalement, à une extrémité, ou qu'il est une cavité.
- divise les flûtes à conduit selon que celui-ci est externe ou interne au tuyau.
- 6ème " : concerne le nombre de tuyaux.
- 7ème " : tient compte de l'état de l'extrémité opposée à la bouche (ouverte, partiellement ouverte, fermée ou résonateur).
- 8ème " : indique la présence ou l'absence de trous.
- 9ème " : permet de séparer des instruments bouchés sans trou, dont l'extrémité inférieure est mobile.

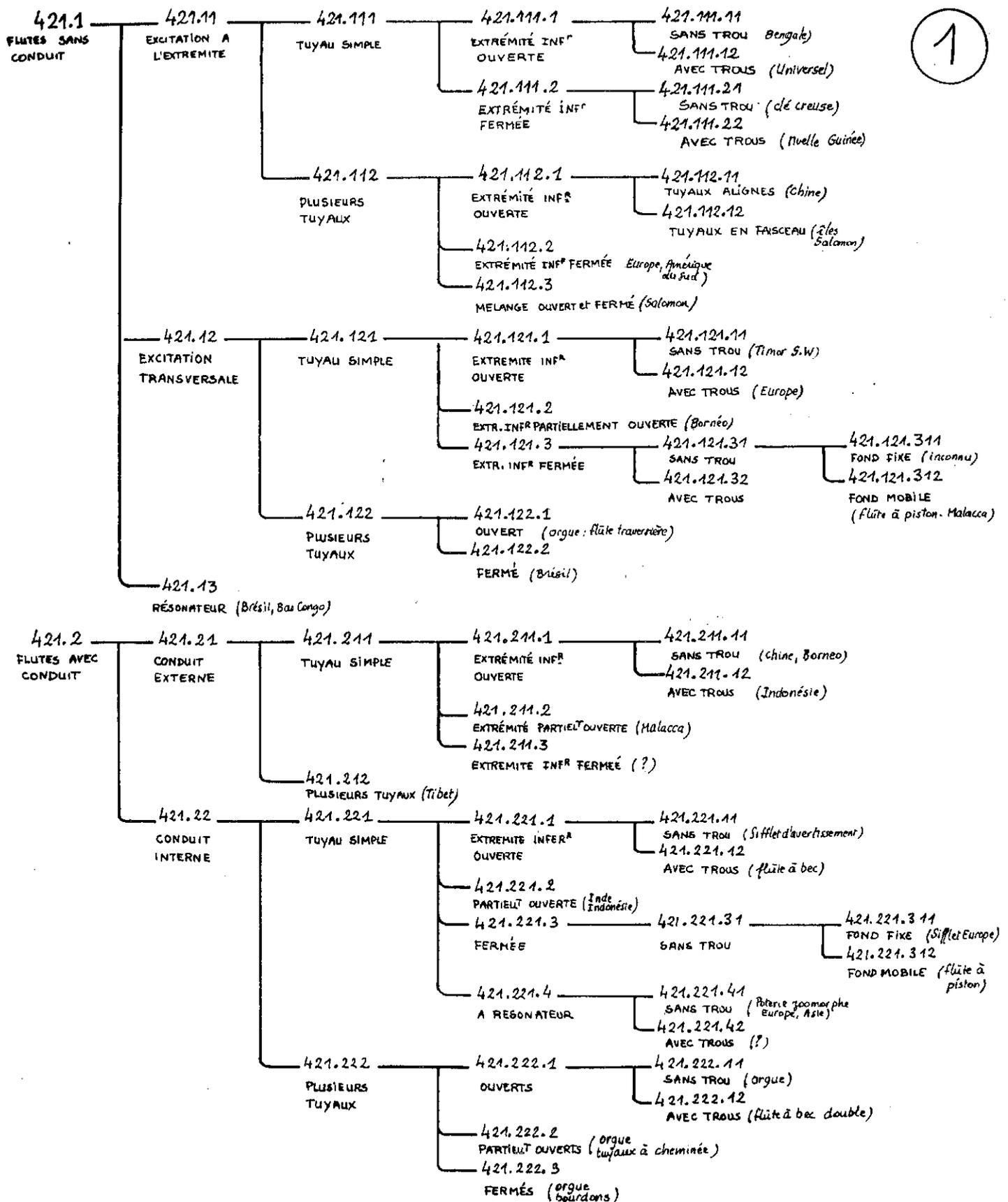
L'ordre des questions posées conduit à mélanger, à un niveau de hiérarchie assez bas, des instruments forts différents, ou, au contraire, à disperser des instruments très proches physiquement et musicalement, qu'on aimerait plutôt regrouper,

Ainsi, la flûte à piston (bourdon à fond mobile) se retrouve dans deux classes très éloignées, séparées à un haut niveau par la présence ou l'absence d'un bec

Par contre, les sifflets, ocarinas, résonateurs sont dispersés selon qu'ils ont à bec, possèdent ou non des trous. Il n'y a d'ailleurs pas de question permettant de séparer les résonateurs des tuyaux, alors que ces deux types d'instruments fonctionnent de façon différente.

Enfin un tuyau bouché à l'extrémité inférieure mais possédant des trous n'est

...../



d'après HORNBOSEL (E.) et SACHS (C.). Systematik der Musikinstrumente. 1914.
zeitschrift für Ethnologie. Heft 4 et 5

plus à proprement parler bouché! On ne voit pas non plus très bien l'intérêt de la question 5 pour les flûtes à conduit : que le conduit soit extérieur ou intérieur au tuyau n'a pas d'incidence sur le son de l'instrument.

On dispose au total d'une trentaine de classes terminales et pourtant neys, flûtes à encoche, flûtes nasales sont toutes regroupées en 421.111.12 et les flûtes à bec en 421.221.12. On aimerait un peu plus de détail pour ces instruments qui constituent, avec les flûtes de pan la grande majorité des flûtes utilisées sur terre.

§ 4.03 - Typologie des instruments

a) Devant les difficultés soulevées par l'établissement d'une classification générale satisfaisante, de type descendant, ELSCHKE et STOCKMAN (cf. Bib. —) proposent la démarche inverse : partant de l'étude d'instruments réels dans toute leur complexité, regrouper ceux qui présentent des points communs, en tenant compte des facteurs historiques et sociologiques, puis définir pour chaque groupe un type d'instrument représentatif.

A défaut d'aboutir à une classification généralisable, une telle typologie a le mérite d'être utilisable immédiatement pour mettre de l'ordre dans un contexte géographique donné.

Déjà en 1967 MOECK avait proposé une typologie des flûtes à bec européennes.

b) Typologie des flûtes à bec européennes

Dans le but d'établir une typologie MOECK pose qu'il est nécessaire de connaître :

- 1) Le matériau et la facture de l'instrument.
- 2) La forme de la lumière et la disposition des parties de l'embouchure.
- 3) Les moyens employés pour modifier la hauteur; essentiellement position et nombre de trous.
- 4) La forme des trous.
- 5) La perce longitudinale.

Au terme d'une description détaillée des principaux types rencontrés l'auteur propose une formule permettant de désigner de manière concise un instrument donné. Le code est le suivant :

- 1) embouchure K = flûte à bec (Kernspaltflöte)
 Z = flûte dont la lumière est formée par les lèvres ou la langue
 (zungespaltflöte)
 T = traversière
 O = ouverte (flûte oblique)

2) Situation des trous sur le tuyau :

- h = trous s'étendant sur les 2/3 du tuyau
- m = trous ne dépassant pas la moitié du tuyau
- b = trous dans le premier tiers du tuyau

3) Nombre de trous = indiqué par le chiffre correspondant

4) Situation du ou des trous de pouce; après le signe + on mettra :

h = au dessus du dernier trou

b = entre les deux derniers trous

e = (égal) à la même hauteur que le dernier trou.

S'il y a deux trous de pouce on l'indique seulement par + 2 .

5) En ce qui concerne la position de la bouche on précisera seulement le cas où elle est du côté opposé aux trous en ajoutant L

Exemples d'applications de cette formule :

Le galoubet est représenté par $K b 2 + h$

La flûte à bec du Siam par $K m 6 L$

Pour séduisante qu'elle soit une telle formule est en fait peu utilisable du point de vue qui nous intéresse car il manque d'importants renseignements sur la perce longitudinale, les rétrécissements terminaux et la taille. D'autre part nous n'avons pas de raison de distinguer sur le plan acoustique le fait que la bouche soit ou non sur la même génératrice que les trous, ni de différencier les trous de pouce, des autres.

§ 4.04 - Classification automatique

La possibilité nous ayant été offerte d'utiliser les récentes techniques de l'analyse des données nous avons pu, en collaboration avec Hubert de FRAYSSEIX qui s'est chargé de la partie informatique et mathématique, faire un essai de classification automatique des flûtes.

Dans un premier temps, (et aussi parce que notre connaissance des instruments utilisant des tuyaux bouchés est plus fragmentaire) nous nous sommes limités aux tuyaux ouverts.

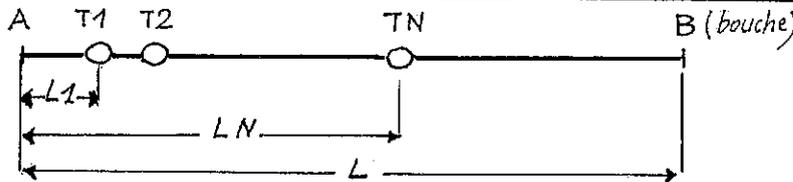
L'échantillon de départ comprenait 27 instruments, choisis parmi ceux dont nous disposons au laboratoire, parce qu'ils représentent des types stables, assez généralement répandus.

Nous avons utilisé le programme de classification ascendante hiérarchique (C.A.H.) de M. JAMBU*. Le principe de base consiste à calculer à l'aide d'un indice, la distance de chaque objet avec tous les autres. Deux facteurs conditionnent en grande partie la forme des résultats : le codage des caractères et l'indice de distance utilisé. Le choix des caractères, tout aussi déterminant, n'est pas un problème spécifique de la C.A.H.

Le travail se déroule de la façon suivante :

- 1) Choix de caractères fondamentaux permettant de différencier les objets suivant le point de vue auquel on se place;
- 2) Mise au point d'un codage binaire pour représenter au mieux les caractères en conservant les proximités existantes.
- 3) Choix d'un indice pour calculer la distance entre les objets. Après différents essais nous avons finalement retenu l'indice de JACCARD que l'on peut énoncer de la façon suivante : rapport entre la somme des caractères spécifiques à chaque objet et le total des caractères.

* cf Bibliographie : BENZECRI et collab. /



D = diamètre intérieur

2

		CODAGE 1	BGAL	BPIB	TBOM	NTAR	EKEN	NASP	BCAT	BTCH	
EMBOUCHURE	1	flûte buccale	EMB	1	1	1	1	0	1	1	
	2	" nasale	EMN	0	0	0	0	1	0	0	
	3	Bouche à l'extrémité	EMH	1	1	0	1	1	1	1	
	4	" latérale	EML	0	0	1	0	0	0	0	
	5	Jet plan	EJP	1	1	1	0	1	1	1	
	6	Jet rond	EJR	0	0	0	1	0	0	0	
	7	Direction jet, fixe	EDF	1	1	0	0	0	0	1	
	8	" " , réglable	EDR	0	0	1	1	1	1	0	
	9	Distance lumière-biseau fixe	ELF	1	1	0	0	0	1	1	
	10	" " " réglable	ELR	0	0	1	1	1	0	0	
TAILLE	11	Plusieurs tuyaux	NT2	0	0	0	0	0	0	1	
	12	$L/D \geq 35$ Taille fine	FIN	1	0	0	1	0	1	0	
	13	$L/D \leq 20$ Grosse taille	GRO	0	1	0	0	0	0	0	
	TROUS	14	$L/L1 \leq 4$ 1 ^{er} trou haut	PTH	0	0	0	0	1	0	0
		15	$L/L1 \geq 8,5$ 1 ^{er} trou bas	PTB	0	0	1	0	1	1	0
		16	$L/LN \leq 1,6$ dernier trou haut.	DTH	0	1	1	0	0	0	0
		17	$L/LN \geq 2,25$ dernier trou bas.	DTB	1	0	0	1	1	1	0
		18	Intervalle $T1/T0 \approx TON$	TON	1	1	0	1	1	0	1
PERCE LONGITUDE	19	Tuyau cylindrique	CYL	1	1	1	0	1	1	1	
	20	" conique convergent	COV	0	0	0	0	0	0	0	
	21	" conique divergent	COD	0	0	0	0	0	0	0	
	22	" conique composite	COP	0	0	0	0	0	0	0	
	23	" cloisonné (roseau)	CLO	0	0	0	1	0	0	0	
	24	" avec gorge (Nô)	GOR	0	0	0	0	0	0	0	
	25	Rétrécissement terminal.	RET	0	0	0	1	1	0	0	
	26	" Initial.	RIN	0	0	0	1	0	0	0	

CODAGE 2 (Perce longle)

		AA	BB	CC								
à la bouche E	E	convergent	1	1	EAA	0	0	0	0	0	0	0
		Rétrécissement cylindr.	0	1	EBB	0	0	0	1	0	0	0
		Divergent	0	0	ECC	1	1	0	1	1	1	1
au milieu M	M	très convergent	1	1	MAA	0	0	0	0	0	0	0
		peu convergent cylindr.	0	1	MBB	0	0	0	1	0	0	1
		Divergent	0	0	MCC	1	1	1	1	1	1	1
à l'extrémité inférieure T	T	convergent	1	1	TAA	0	0	0	0	0	0	0
		Rétrécissement cylindr.	0	1	TBB	0	0	0	1	1	0	0
		Divergent	0	0	TCC	1	1	1	1	1	1	1
28	Tuyau cloisonné (roseau)	CLO	0	0	0	1	0	0	0	0		

BGAL = Galoubet

BPIB = Pipeau de bambou

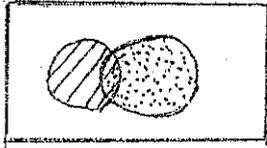
NTAR = Ney Turco-arabe

EKEN = Kéna argentine

NASP = flûte nasale des Philippines

BCAT = caval Turc

BTCH = flûte à bec Tchecoslovaque.



$$\frac{A \triangle B}{A \cup B} = \frac{A \cup B - A \cap B}{A \cup B} = 1 - \frac{A \cap B}{A \cup B}$$

- 4) A partir du tableau des distances, tracé d'un arbre dont l'interprétation doit permettre de reconnaître la hiérarchie entre les caractères.
- 5) L'ensemble des (n) objets à classer situés en fonction de leurs distances respectives dans un espace à (n) dimensions constitue un nuage dont l'étude (forme, densité, inertie) peut apporter d'utiles renseignements pour l'interprétation de l'arbre.

Le nuage que nous avons obtenu avec les 27 flûtes était fortement allongé, assez aplati et creux en son centre; les instruments sont donc assez également distincts et on peut passer, de proche en proche d'un type d'instrument à un autre, ce que l'on constate effectivement et qui rend la classification difficile.

- 6) Ayant défini les principaux axes d'inertie, (ceux qui donnent au total environ 95 % de l'inertie) il est possible de recalculer une distance plus différenciée entre les objets et de procéder à nouveau à leur classification; le résultat obtenu est en principe semblable au premier si le nombre des axes est suffisant. Cette technique, plus stable, s'applique aisément à un grand nombre d'instruments : les différentes classes ne sont plus modifiées par l'entrée de nouveaux instruments.

Le travail que nous avons ainsi effectué a été profitable à divers titres. En particulier le choix des caractères et la mise au point du codage qui s'est faite en plusieurs étapes, bénéficiant à chaque modification des renseignements tirés de l'analyse de l'arbre, nous ont amenée à une réflexion approfondie sur les critères acoustiques des instruments.

- Choix des caractères et codage.

Pour un premier essai nous avons retenu 26 caractères : 10 ayant trait à l'embouchure et 16 au tuyau.

fig.2

Les caractères 1 à 10 se rapportent au mode de production du souffle (nasal ou buccal), à la situation de l'embouchure sur le tuyau (latérale ou à l'extrémité) à la forme du jet, à son orientation et à la distance lumière-biseau. Les caractères 11 à 26 concernent le nombre de tuyaux, la taille, la situation du 1er trou, celle du dernier, l'intervalle T1/T0 et la perce longitudinale. On montre fig.2 le codage de quelques instruments connus.

Un deuxième essai de codage nous a permis d'entrer des instruments de perce longitudinale compliquée et d'en tenir compte dans le classement. Nous avons retenu des informations sur la perce en trois points du tuyau : près de l'embouchure, près de l'extrémité terminale et l'allure générale entre les deux : conique convergent accentué, conique convergent léger, cylindrique, conique divergent, cylindrique avec rétrécissement local. Ayant déterminé le code de façon à conserver les proximités existantes nous avons obtenu des résultats satisfaisants.

fig.3
Pl. 81

La figure 3 montre les arbres obtenus avec les deux premiers codages. Les instruments se partagent en deux grandes classes : embouchure fixe et embouchure variable. A l'intérieur de ceux-ci on retrouve les flûtes traversières, les flûtes obliques et les nasales. Les flûtes à encoche sont plus difficilement identifiées : on les retrouve associées tantôt aux flûtes obliques tantôt aux traversières.

La partition des flûtes à bec se fait ensuite selon l'embouchure (bec modifiable ou non), puis la perce longitudinale, et en dernier lieu la taille et le nombre

.... /

de trous. L'ordre des critères est le même pour les instruments à embouchure variable

✗ ~~L'analyse des correspondances a montré~~, selon notre attente, de bonnes corrélations entre :

- taille fine, trous situés bas, échelle de base à 1/2 tons
- grosse taille, trous étendus sur l'instrument, échelle de base à tons.

Nous nous proposons d'augmenter la taille de l'échantillon pour obtenir si possible une classification plus générale, applicable à des instruments de provenance quelconque, et en particulier à ceux de la collection du Musée de l'Homme.

Cette méthode de travail est finalement très proche de la typologie : partant de types connus existants, et de l'analyse des rapprochements effectués on essaie de dégager des traits généraux ordonnant les variantes, pour rejoindre une systématique basée cette fois sur la réalité.

§ 4.05 - Eléments pour une classification sur des bases acoustiques

fig.4

Au terme de l'étude acoustique des tuyaux à embouchure de flûte nous pouvons espérer disposer d'une meilleure connaissance des critères physiques nécessaires pour classer les instruments à embouchure de flûte. fig.4

En premier lieu nous distinguerons les instruments utilisant des tuyaux de ceux qui utilisent des cavités quelconques (résonateur fixe ou variable percé ou non de trous) et nous réserverons le nom de flûtes aux premiers.

La deuxième question concerne l'état du tuyau : est-il strictement fermé (bouché et sans trou) ou ouvert ailleurs qu'à la bouche ? Ceci nous permet de séparer des instruments fonctionnant sur des séries de partiels différentes et ayant recours à des moyens différents pour modifier la hauteur :

- tuyaux bouchés : - multiplication des tuyaux (avec adjonction éventuelle de tuyaux ouverts pour modifier le timbre)
- modification de longueur par coulisse.
- tuyaux ouverts : - combinaison de trous latéraux
- utilisation de plusieurs séries de partiels.

Notre étude ayant porté principalement sur les tuyaux ouverts nous proposons pour ceux-ci les critères suivants :

- excitation fixe (bec), semi-réglable (bec modifiable) ou réglable.
- les flûtes à excitation réglable peuvent être nasales ou buccales.
- les flûtes buccales ont un jet rond (neys) ou plan
- enfin les flûtes à jet plan sont à encoche ou traversières.

A partir de là il devient hasardeux de continuer une classification hiérarchisée en ordonnant les critères; on aboutit plutôt à des types d'instruments qui représentent chacun un compromis entre la taille, la place et la dimension des trous, et la perce.

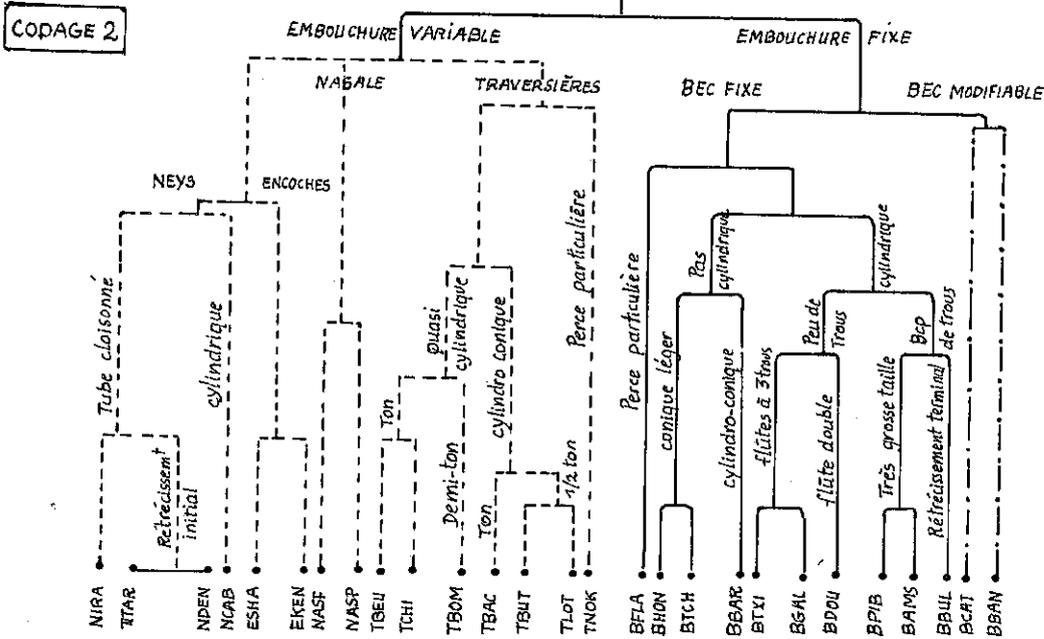
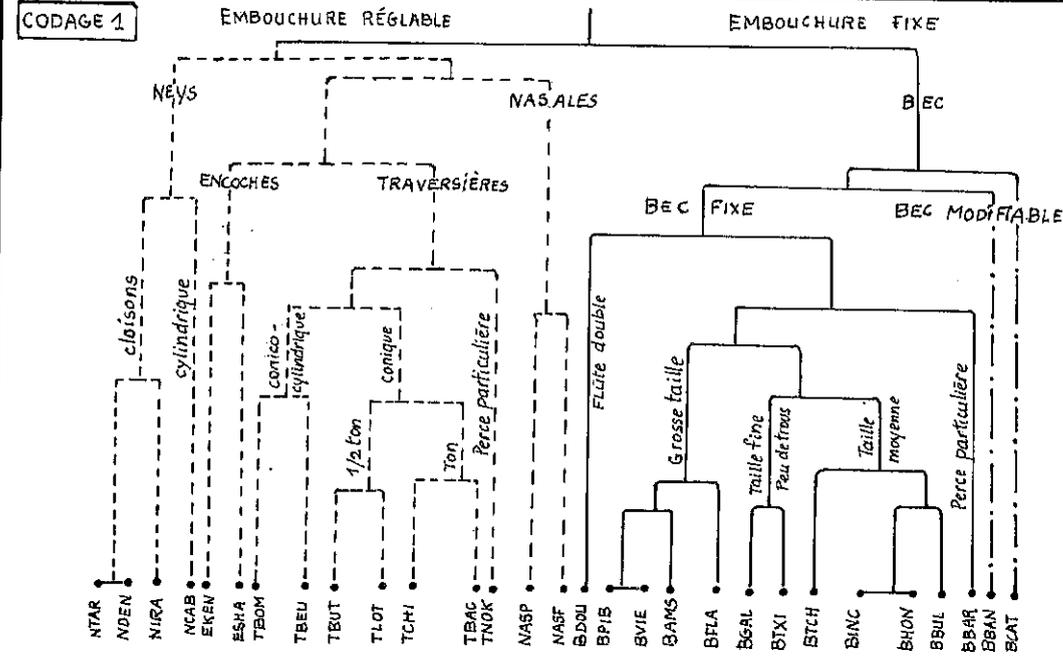
On peut diviser ainsi toutes les classes de flûtes ouvertes en regroupant les instruments en :

- flûtes à partiels : taille très fine, trous bas placés, de grande dimension relativement au diamètre du tube.

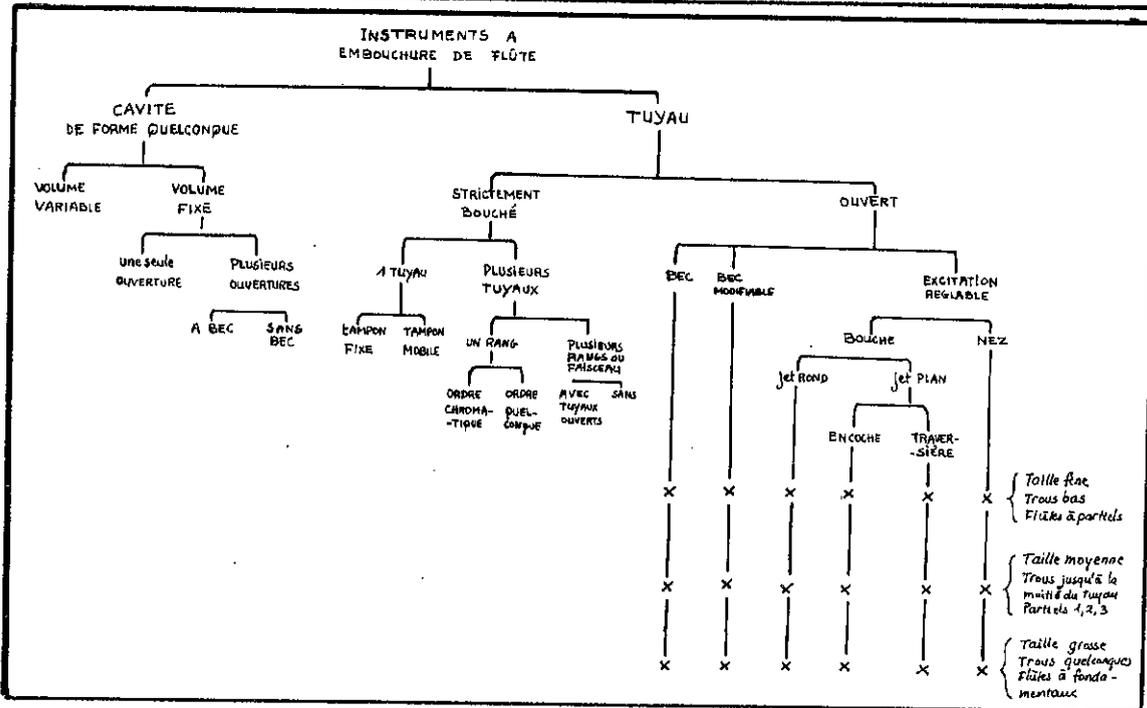
✗

...../

3



4



- flûtes mixtes : tailles moyenne, trous pouvant dépasser la moitié du tuyau.
- flûtes à fondamentaux : grosse taille, trous de place et de dimension quelconque.

D'une façon générale ces caractéristiques seront plus nettement déterminées dans les flûtes à bec où, l'excitation étant fixée par la bouche, les proportions du tuyau et la position des trous sont déterminés en fonction de l'utilisation de l'instrument.

⊗ La représentation euclidienne de l'ensemble des flûtes, calculée comme il a été dit plus haut, a permis de montrer,

CHAPITRE II

FICHES CARACTERISTIQUES DE QUELQUES INSTRUMENTS TYPES

§ 4.06 - Généralités

Parmi les instruments que nous avons étudiés nous en avons choisi quelques uns qui, selon nous, représentent des types auxquels peuvent se rattacher la plupart des flûtes connues. Chacune des flûtes dont nous avons fait l'étude n'est pas obligatoirement l'instrument le plus excellent ni le plus représentatif du type étudié, mais il s'agit d'instruments que nous avons eu à notre disposition pendant de longues périodes, donc que nous avons pu jouer et examiner soigneusement.

Pour chacun d'eux nous avons porté, à côté des dessins faits d'après photographie, les principales mensurations, et nous avons rédigé une fiche donnant des renseignements complémentaires.

Notre but premier était de fournir de façon concise, une description aussi précise que possible d'instruments auxquels il est souvent fait allusion au cours de l'étude expérimentale. Nous espérons montrer, à propos de chacun d'eux comment se conjuguent les diverses exigences de la facture, et de l'emploi musical, et mettre en lumière l'originalité des solutions acoustiques adoptées. Des renvois permettront de retrouver dans les Parties 2 et 3 les expériences que nous avons faites à propos de ces instruments.

§ 4.07 - Dessin des instruments et mensurations

Les colonnes situées à la droite du dessin donnent les indications suivantes

- N° : le numéro du trou
- d : le diamètre de chaque trou
- s/S : le rapport de la surface du trou (ou de la bouche) à celle du tuyau mesurée au même endroit
- ε : l'épaisseur de la paroi
- L : la distance comptée depuis le bouchon pour les flûtes à bec et traversière, et depuis le bord supérieur du tuyau pour les flûtes obliques et à encoche.

Toutes les mensurations sont en mm.

- Perce longitudinale :

On a représenté sous forme d'un diagramme, l'allure de la perce longitudinale du tuyau. Afin de pouvoir comparer instantanément les différents instruments, quelles que soient leurs dimensions absolues, nous avons adopté une longueur standard pour $AB = 200$ mm. On porte alors les diverses valeurs du diamètre sur une échelle rapportée à la longueur de l'instrument : $D/L \times 100$, ce qui fait apparaître la " grosseur " relative des instruments, les uns par rapport aux autres. On peut lire la valeur absolue du diamètre à la partie supérieure du diagramme. Cette façon de procéder appelle quelques remarques. Nous savons bien que les instruments ne sont pas homothétiques et que le paramètre taille (ici son inverse) évolue avec les dimensions de l'instrument. Il faut donc le " pondérer " selon la tessiture. Nous pensons toutefois que l'intérêt

des dessins ramenés dans un cadre unique se justifie pleinement pour une première comparaison à vue.

Nous avons pu mesurer avec assez de précision la perce de tous les tuyaux sauf celle des 2 neys en roseau pour lesquels seuls les points de mesure relevés au niveau des trous et à chaque extrémité sont certains. Le reste du diagramme est donné comme une allure possible déduite de l'examen des roseaux.

Lorsque les flûtes possèdent des trous supplémentaires nous avons estimé la limite inférieure du tuyau (A) à partir d'une copie de l'instrument.

§ 4.08 - Remarques à propos des fiches

Tous les renseignements que nous donnons (origine, matériau, timbre etc...) se rapportent exclusivement à l'instrument décrit dans la fiche et sur la planche correspondante.

L'échelle de base que nous donnons dans les fiches peut n'avoir que de très lointains rapports avec la musique jouée effectivement sur l'instrument, surtout pour les instruments extra-européens. Il faut la considérer comme une donnée acoustique permettant de comparer les tuyaux entre eux, d'autant que les intervalles indiqués ne sont qu'approximatifs.

Nous avons adopté comme convention pour ceux-ci :

T = Ton t = 1/2 ton θ = 3/4 de ton (t < θ < T)

Nombre de trous débouchés : il s'agit toujours de l'ouverture successive de tous les trous comptés depuis le bas.

(f) signifie fourche.

Enfin sur le dessin de l'instrument, une indication en pointillé veut dire que l'élément (trou ou bouche) est sur la face opposée de l'instrument.

Les instruments 1 à 8 sont des flûtes à bec.

Le N° 9 une flûte à encoche.

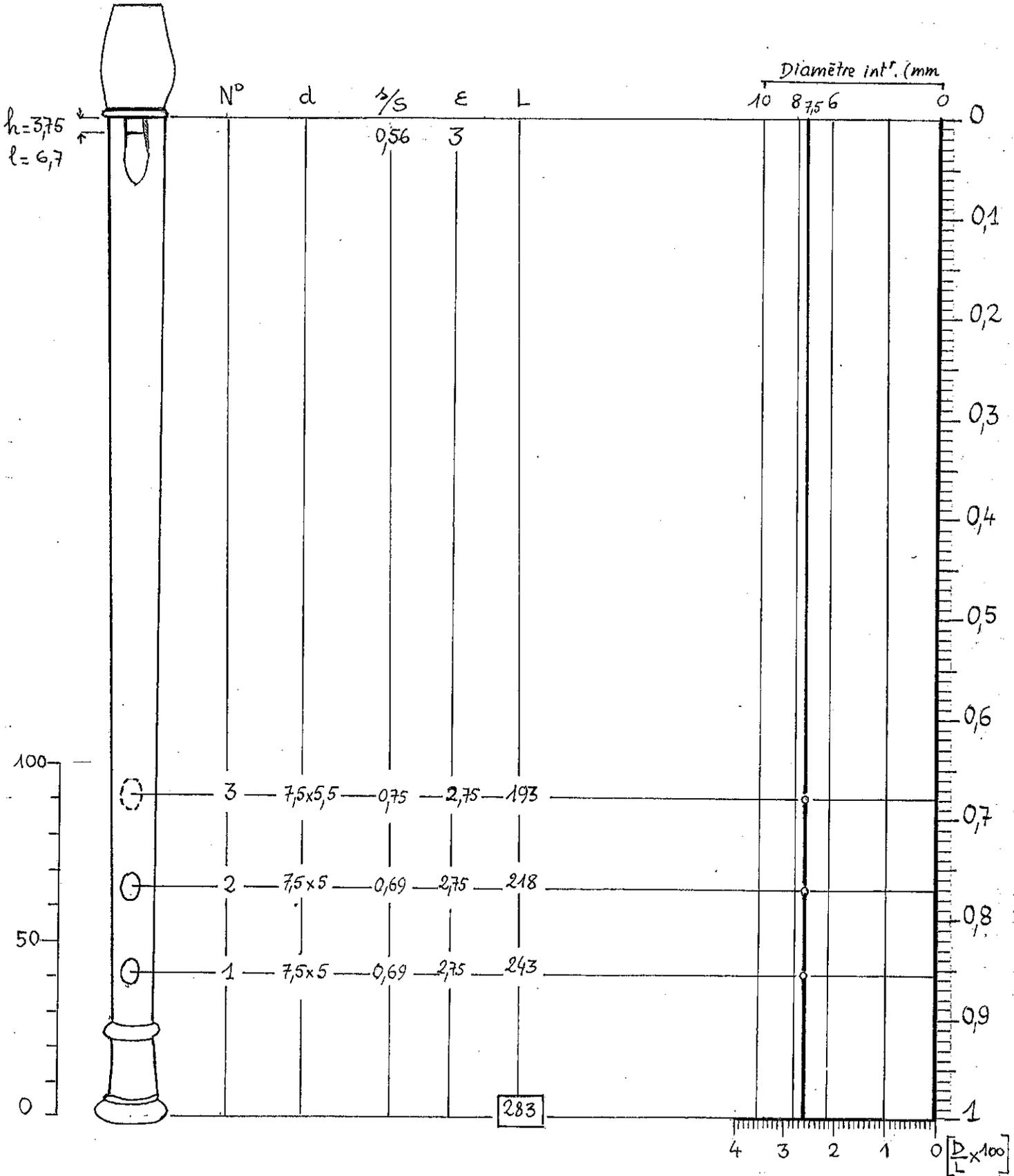
10, 11, 12 trois flûtes traversières.

13 et 14 deux flûtes obliques.

1. GALOUBET

entrée $\varepsilon_1 = 2,5$
 $l = 7$

lumière $\varepsilon_2 = 1,05$
 $l = 6,5$



1. GALOUBET

FLUTE A BEC A TROIS TROUS

Fiche N° 1

Origine Géographique : Provence

Epoque d'utilisation : Instrument traditionnel déjà décrit par VIRDUNG (1511).

Ce galoubet a été fait en 1965 par Marius FABRE, tambourinaire à Barjols (Var)

Matériau : Bois tourné; buis.

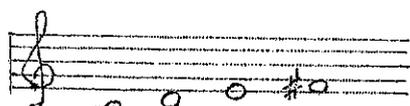
Perce et taille : perce cylindrique
taille très fine.

Facture : étant donné les petites dimensions de l'instrument la difficulté essentielle réside dans la réalisation d'une perce précise qui doit être le plus parfaitement cylindrique possible. Il faut également que la bouche ait une hauteur adaptée pour permettre un étalement correct du champ de liberté en pression des partiels (cf. § 2.25 et 2.59).

Trous : 3 trous dont 1 derrière pour le pouce

L'instrument se joue d'une main, généralement la gauche, l'autre étant employée à toucher le tambourin.

Echelle de base :



TROUS OUVERTS 0 1 2 3
INTERVALLES T T T

3 tons successifs comme l'instrument décrit par MERSENNE.

Il diffère de la Chirula dont la succession est T, T, t.

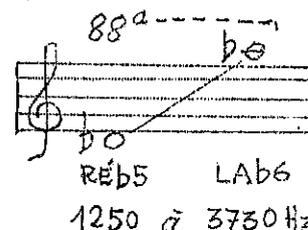
Etendue - tessiture : L'instrument est construit pour utiliser les partiels 2, 3, 4 et 5. Le partiel 1, trop faible est inutilisable.

L'étendue est d'une octave plus une quinte.

La hauteur réelle est à deux octaves au dessus de la notation.

Le galoubet dit en Sib a pour fondamental Réb5

On voit que la tessiture, très aiguë, permet à l'instrument d'émerger facilement même avec une faible intensité et un faible débit.



1250 à 3750 Hz

Timbre : Eu égard à la tessiture le timbre a une importance secondaire car les harmoniques sortent rapidement du champ audible, les points importants sont la précision, et la sûreté de l'attaque.

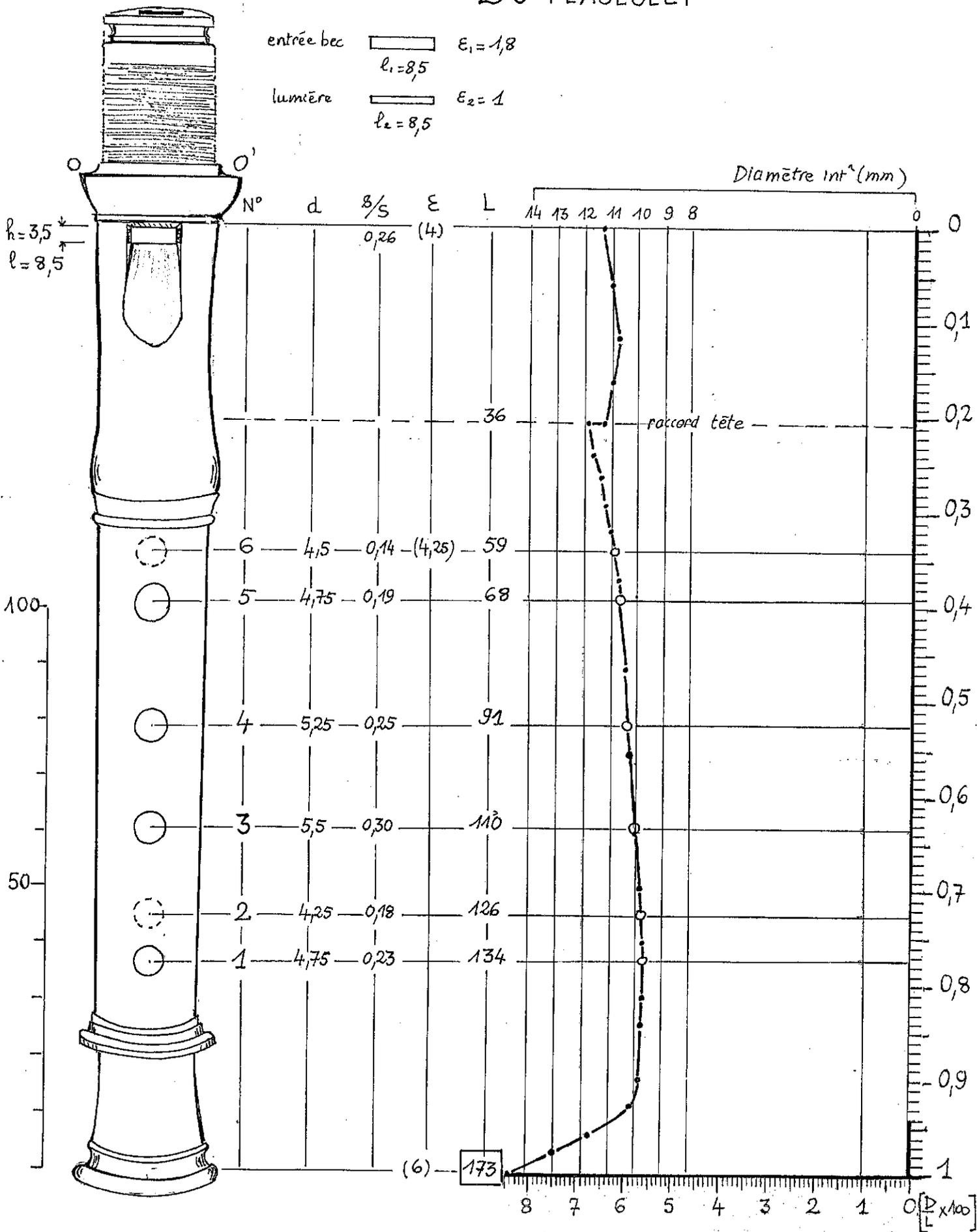
Autres instruments : Les documents historiques montrent des instruments de plus grandes dimensions que celui-ci : le galoubet basse de PRAETORIUS mesure 700 mm. Ces instruments, abandonnés, connaissent un renouveau aujourd'hui grâce à l'initiative de M. FABRE qui en reconstruit.

Conclusion, originalité : Type de flûte à partiels adaptée au jeu d'une seule main et à l'association avec un tambourin, les deux instruments se complétant sur le plan musical et spectrographique.*

* Cf. Bulletin du GAM N° 23

20 FLAGEOLET

entrée bec $\epsilon_1 = 1,8$
 $l_1 = 8,5$
 lumière $\epsilon_2 = 1$
 $l_2 = 8,5$



2. LE FLAGEOLET

FLUTE A BEC A SIX TROUS

Fiche N° 2

Origine géographique : Flageolet construit par THIBOUVILLE-BUFFET à Paris.

Epoque d'utilisation : Inconnue; probablement le XIXème siècle.

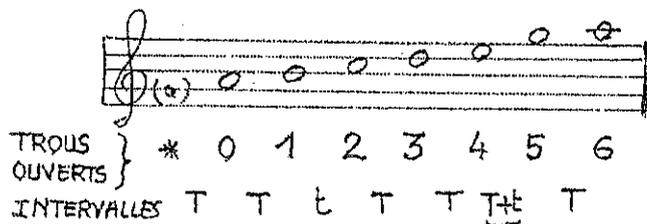
Matériau : bois tourné; ébène.

Perce et taille : Perce cylindro-conique avec un évasement terminal.
Grosse taille.

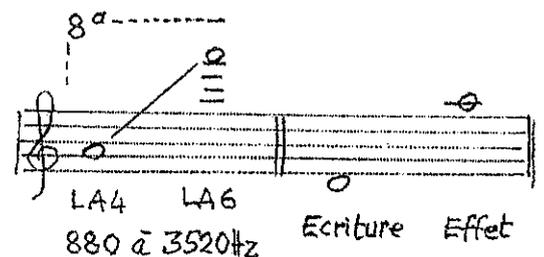
Facture : L'instrument a pour particularité d'être muni d'un conduit venant s'appliquer sur le rebord DD'. Ce porte-vent, qui double pratiquement la longueur, renfermait dans sa partie renflée une petite éponge pour absorber l'humidité du souffle. L'usage du porte-vent a aussi pour effet d'éloigner l'instrument de la bouche (donc de l'oreille) de celui qui en joue, ce qui en rend le son plus supportable.

Trous : 6 trous dont deux à la face arrière pour les pouces. Ce système, déjà décrit par MERSENNE (P. 232 du livre des Instruments) est caractéristique du flageolet.

Echelle de Base :



* L'instrument étant très court on peut à l'aide du petit doigt boucher partiellement l'extrémité inférieure pour faire ce son.
(Indiqué dans toutes les méthodes).



Etendue : Deux octaves par sons chromatiques.

On utilise le partiel 2 jusqu'au Mi, puis le partiel 3.

C'est un instrument de tessiture aiguë (800 à 3500 Hz).

Dans l'écriture musicale il est transpositeur et s'écrit une octave et une quinte plus bas que le son réel.

La taille étant assez grosse on peut ajuster la hauteur dans une assez grande mesure, d'autant que la tessiture aiguë rend moins exigeant sur la justesse.

Timbre : L'énergie est concentrée dans les premiers harmoniques.

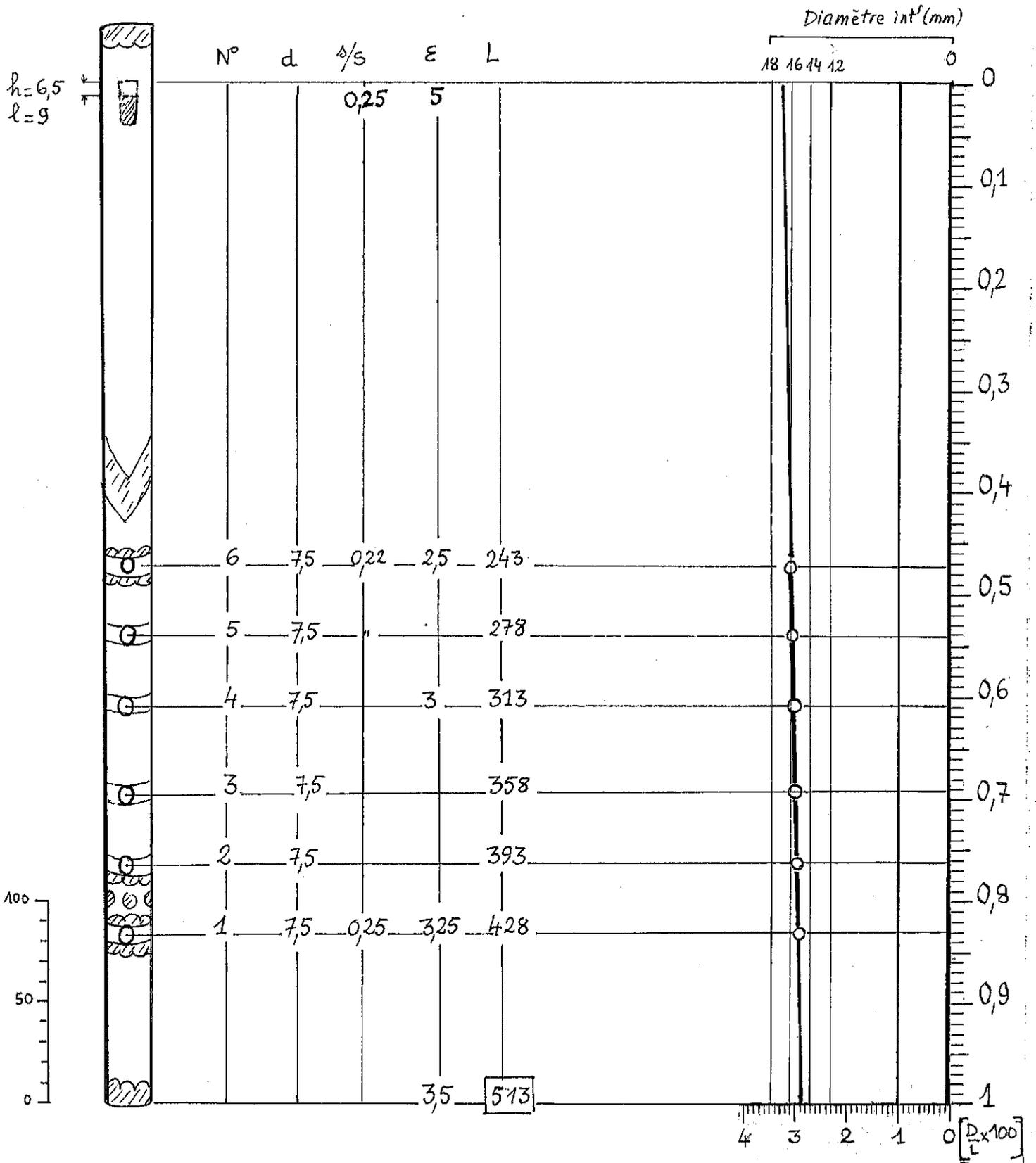
Autres instruments de la même famille : il semble que le flageolet ait toujours été de petites dimensions.

Conclusion, originalité : Le système de trous de cet instrument représente une solution originale au problème de la justesse des instruments de tradition européenne. Le fait d'avoir confié le 2ème trou au pouce de la main inférieure facilite la fourche de la tierce majeure, mais du même coup entraîne l'immobilisation du 4ème et du 5ème doigt pour tenir l'instrument. Une virole est d'ailleurs prévue à cet effet. C'est là sans doute une des raisons des petites dimensions de l'instrument.

30 FLUTE A BEC A 6 TROUS

entrée bec $\varepsilon_1 = 1,6$
 $l_1 = 9$

Lumière $\varepsilon_2 = 0,85$
 $l_2 = 8,5$



3. LA FLÛTE A 6 TROUS

FLÛTE A BEC A SIX TROUS

Fiche N° 3

Origine géographique : Tchécoslovaquie.

Epoque d'utilisation : Instrument traditionnel.

Matériau : Bois tourné (érable ?)

Perce, Taille : Taille moyenne
Perce faiblement conique, embouchure au gros bout.

Facture : Relativement simple. Traditionnellement l'instrument est fait par le musicien (berger, pasteur).
Le fait de placer la bouche du côté opposé aux trous dispense de tailler la forme extérieure du bec.

Trous : 6 trous de même dimension, placés du même côté et groupés en deux systèmes.
Equidistance de 1 à 2, 2 à 3; 4 à 5 et 5 à 6. (p = 35 mm).

Echelle de base :

TROUS OUVERTS	0	1	2	3	4	5	6
INTERVALLES		T	̂	̂	T	T	̂

Le 3ème son fait un intervalle de tierce neutre avec le fondamental (cf § 3.31).

3ce Min. < 3ce neut. < 3ce Majeure
Même chose pour le 7ème son, intermédiaire entre la 7° majeure et la 7° mineure.

Etendue, Tessiture : Le partiel 2 est utilisable pour tous les fondamentaux; le partiel 3 pour les 3 premiers fondamentaux.

Etendue de deux octaves plus quelques sons.

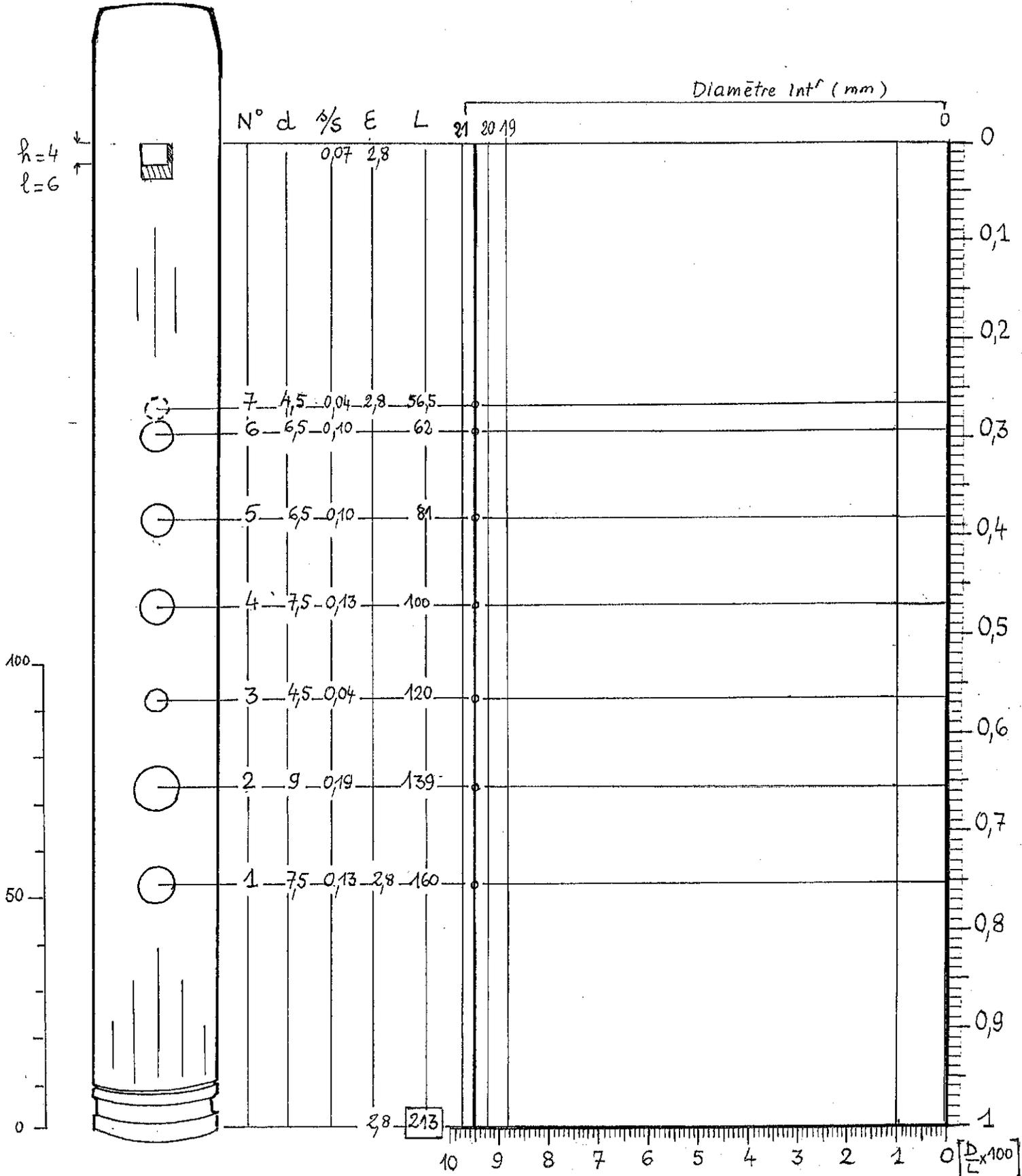
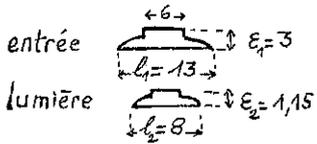
Un bon musicien ajuste la hauteur en utilisant des fourches ou en jouant sur le recouvrement partiel des trous. Il obtient ainsi tous les sons chromatiques.

Mib3 Mib5
310 à 1250 Hz

Timbre : L'instrument que nous avons étudié, soigneusement construit, possède un timbre très riche en harmoniques et une attaque précise.

Conclusion : La flûte à six trous est un instrument que l'on trouve, sous des aspects divers, répandu dans toutes les parties du monde, principalement en Europe et dans les pays avoisinants. L'instrument offre un bon compromis entre les exigences anatomiques (longueur totale, diamètre et espacement des trous), les possibilités musicales (nombre et justesse des partiels, échelle de base adaptable à divers systèmes musicaux) et une construction sans grande difficulté à la portée d'un homme habile.

4 o PIPEAU DE BAMBOU



4. LE PIPEAU DE BAMBOU

FLUTE A BEC A 7 TROUS

Fiche N° 4

Origine : France

Epoque : Instrument construit au cours d'un stage d'apprentissage organisé par la Guilde des Faiseurs et Joueurs de Pipeau (1961) et les C.E.M.E.A.

Matériau : Bambou.

Perce : Quasi cylindrique (peut varier selon le morceau de bambou utilisé).

Taille : Grosse taille.

Facture : Construction aisée, accessible à des enfants encadrés.
Le bec est fermé par un bouchon de liège.

Trous : 7 trous de dimensions inégales, dont un pour le pouce (N° 7).
Le premier trou est situé au quart inférieur du tuyau, le 7ème au quart supérieur.
On perce les trous successivement en partant du premier, et on agrandit chaque trou jusqu'à ce que l'on obtienne l'intervalle désiré.

Echelle de base :

TROUS OUVERTS	0	1	2	3	4	5	6	7
INTERVALLES		T	T	t	T	T	T	t

L'instrument est construit pour donner une gamme diatonique majeure

Etendue et tessiture : Etant donné la grosse taille de l'instrument et la faible ouverture de la bouche les partiels 2 et 3 sortent difficilement et sont très faux. L'étendue courante est d'une dixième (une octave + deux notes).

L'instrument (soprano) a pour fondamental Ré₄ ; on l'écrit une octave plus basse que la réalité

RE ₄	FA# ₅
590	1400 Hz

Timbre : La grosse taille et la faible ouverture de la bouche ($s/S = 0,07$) confèrent à l'instrument un timbre très particulier, " chaud, moelleux ",... où l'intensité du fondamental prédomine largement.

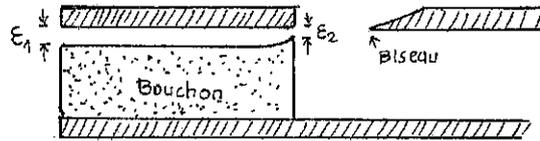
Autres instruments de la même famille : Il existe également des pipeaux alto, ténor et basse, respectivement en LA₃, Ré₃ et La₂. La qualité du son de ces instruments est particulièrement bien adaptée au jeu d'ensemble; on obtient une bonne fusion.

Conclusion, originalité : Instrument conçu pour permettre une initiation pratique des enfants à la musique par la fabrication de leur instrument, et l'éducation de l'oreille au cours de la construction, le pipeau est nécessairement limité. C'est une flûte à fondamentaux, de faible étendue mais bien adaptée au jeu d'ensemble, et de timbre original.

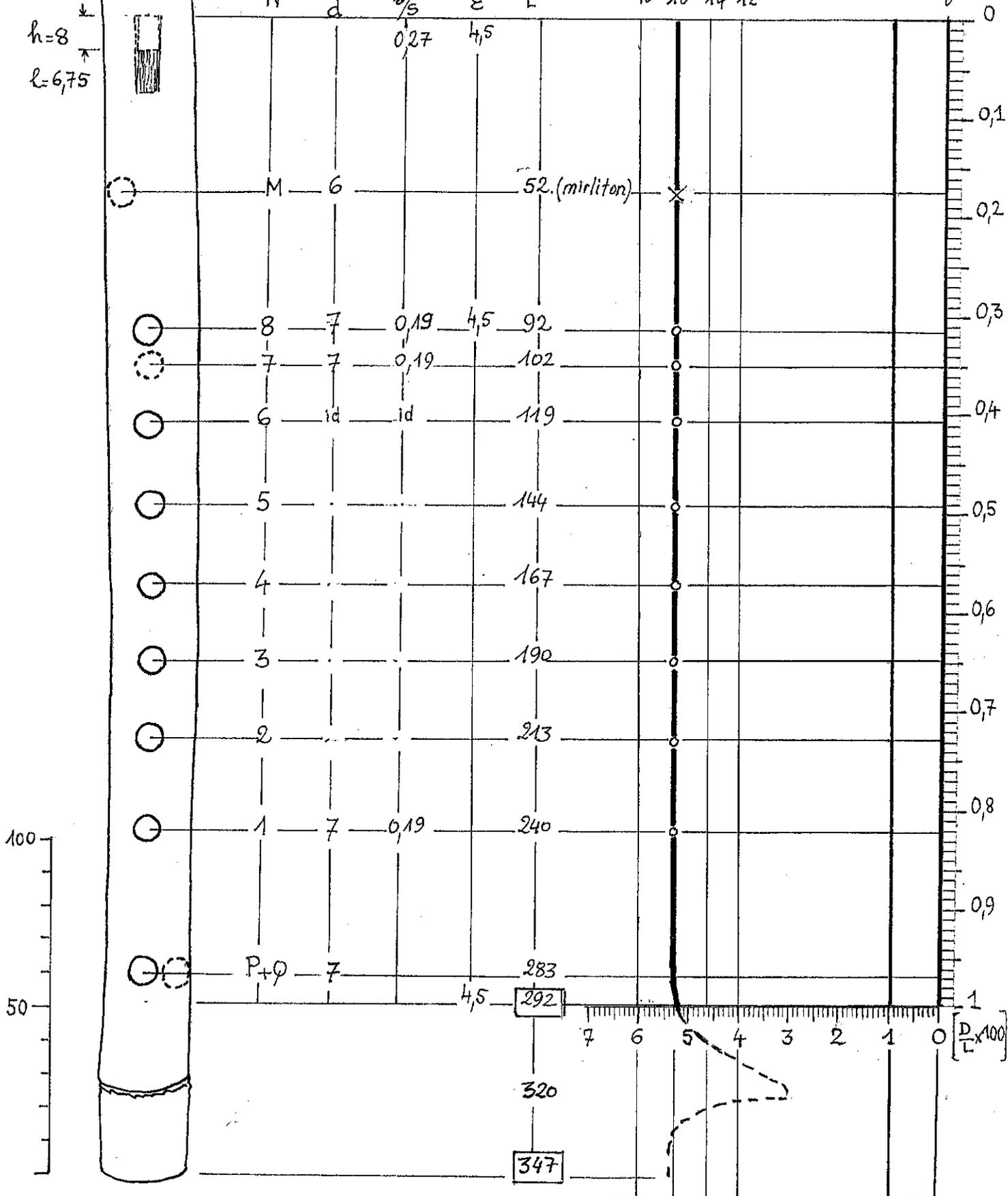
5. FLUTE A BEC A 8 TROUS

Entrée $\epsilon_1 = 2,5$
 $l_1 = 12$
 lumière $\epsilon_2 = 1,5$
 $l_2 = 9$

COUPE LONGITUDINALE DU BEC $\leftarrow h \rightarrow$



Diamètre Int^r (mm)



5. FLUTE DE THAÏLANDE

FLUTE A BEC A 8 TROUS

Fiche N° 5

Origine : Probablement la Thaïlande (cf. instrument identique décrit par MOECK (bib., flûte n° 49). Le nom d'origine serait Khlui.
L'instrument présent a été acheté chez un marchand de musique parisien en 1964.

Epoque d'utilisation : Instrument traditionnel

Matériau : Bambou

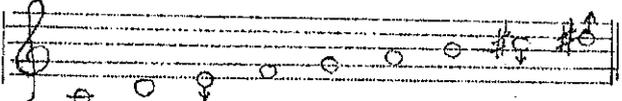
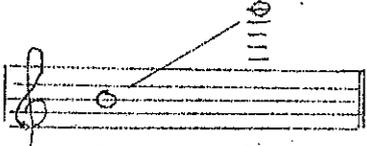
Perce ; taille : Perce quasi-cylindrique
taille moyenne.

Facture : Assez simple.

Le canal est constitué par le seul évidement du bouchon, ce qui donne une forme de demi-lune à la lumière. Pour obtenir une convergence suffisante et assurer au jet d'air une bonne orientation, la paroi aplanie du bouchon est fortement incurvée près du bord inférieur, proche de la lumière. L'embouchure étant du côté opposé aux trous il n'y a pas de bec proprement dit.

Trous : 8 trous identiques, quasiment équidistants si on excepte le 7ème pour le pouce. Les deux trous P et Q situés près de l'extrémité inférieure restent toujours ouverts (il est d'usage d'y accrocher des décorations : rubans, pompons etc...). Pour estimer la longueur acoustique de l'instrument on a fait une copie de l'instrument sans bout-mort (voir § 3.23).
Le trou M situé près de l'embouchure doit être recouvert d'une membrane très fine dont on règle la tension pour qu'elle vibre sur toute l'étendue de l'instrument à la façon d'un mirliton (cf. § 3.78).

Echelle de base : En débouchant les trous l'un après l'autre on obtient approximativement:

		
TROUS OUVERTS	0 1 2 3 4 5 6 7 8	
INTERVALLES	T T T T T T T+ε	S13 S15 500 à 2000Hz

Etendue, tessiture : Le partiel 2 est utilisable sur les 7 premiers fondamentaux et le partiel 3 sur les 3 premiers, ce qui donne finalement deux taves d'étendue.

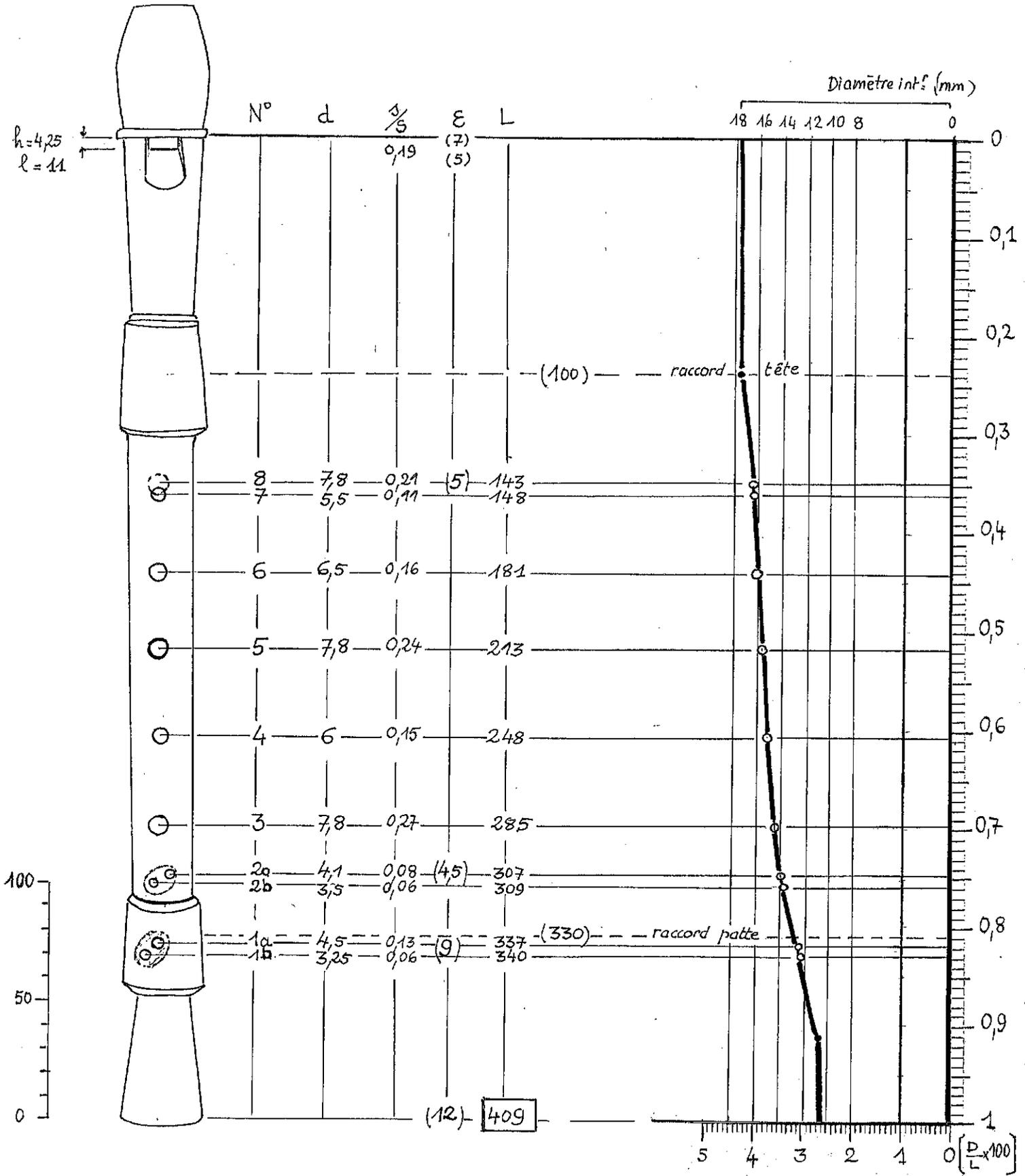
Timbre : L'usage du mirliton confère à l'instrument un timbre tout à fait particulier, voisin de celui d'un instrument à anche (cf. § 3.78). Les harmoniques sont très nombreux et l'attaque particulièrement nette.

Autres instruments : L'instrument existe en diverses dimensions. Nous en avons un de 265 mm de long (fond. MI4). L'instrument décrit par MOECK a 455 mm de long.

Conclusion, originalité: Ce type d'instrument a sans doute des rapports étroits avec notre flûte à bec occidentale, qui est devenue conique. Les 9 fondamentaux couvrent plus d'une octave, ce qui permet d'employer un tuyau de plus grosse taille que la flûte à 6 trous, donc d'obtenir plus d'intensité sur les sons graves. Par ailleurs l'emploi du mirliton, originaire de Chine, permet à l'instrument d'émerger d'un ensemble même important.

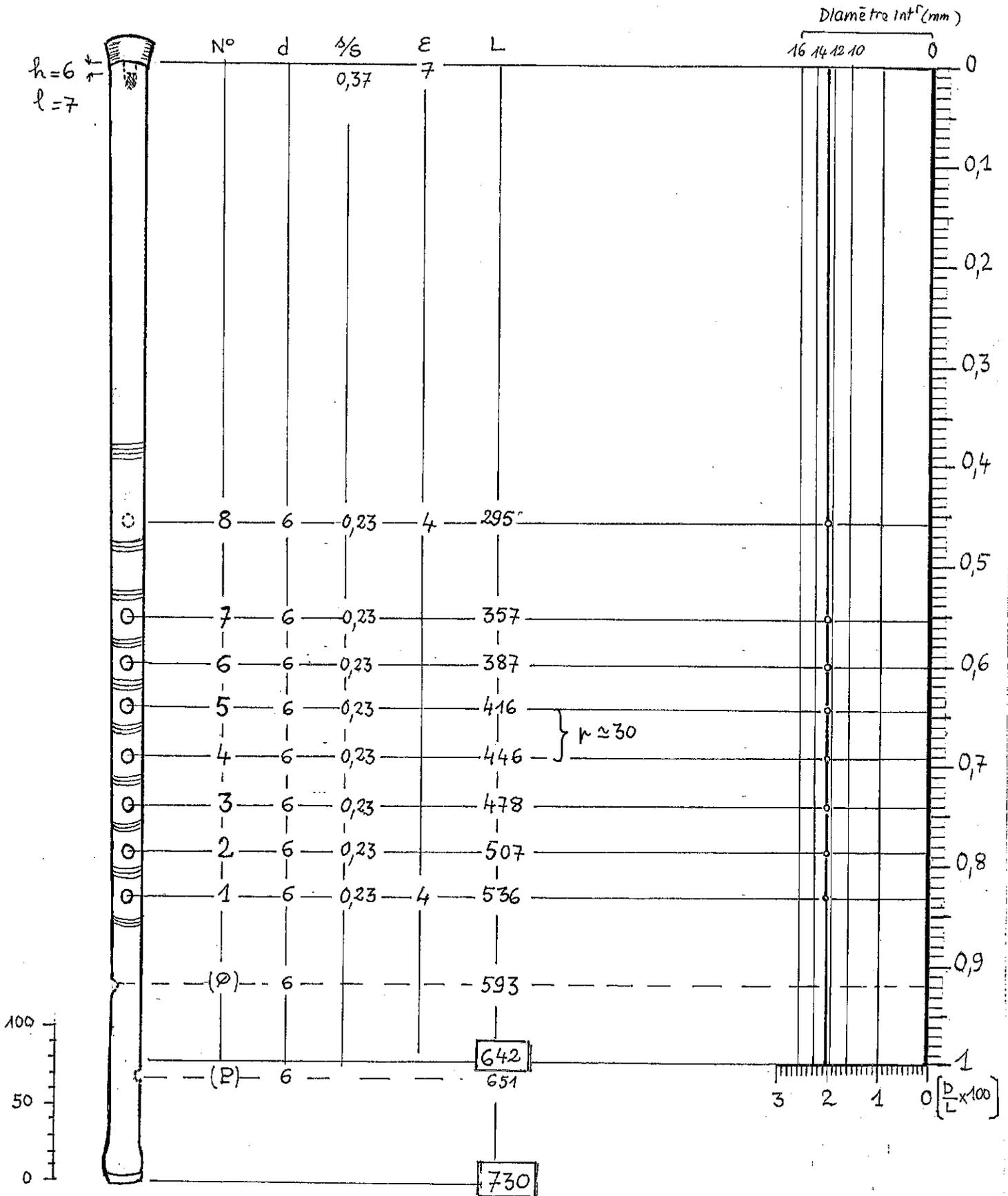
6. FLÛTE A BEC, TYPE XVIII'S

entrée du bec $\epsilon = 2,2$
 $l_1 = 12,5$
 Lumière $\epsilon = 0,9$
 $l_2 = 11$



70 CAVAL TURC

entrée bec $\epsilon_1 = 1,5$
 $l_1 = 8$
 lumière $\epsilon_2 = 0,6$
 $l_2 = 7$



7. LE CAVAL TURC

FLUTE A BEC A HUIT TROUS

Fiche N° 7

Origine : Istanbul (instrument acheté chez un antiquaire).

Epoque d'utilisation : Instrument traditionnel.

Matériau : Bois tourné (?)

Perce, taille : cylindrique
Taille très fine.

Facture : Le tuyau qui mesure 730 mm est d'un seul morceau.
La longueur réduite du canal et la situation de la bouche, opposée aux trous en font une flûte à bec modifiable (cf. § 2.65).

Trous : Les deux trous P et Q restent ouverts en permanence (bout mort, cf. § 3.23).
La longueur acoustique du tuyau a été estimée à l'aide d'une copie. Les 7 premiers trous, équidistants, ($p \approx 30$ mm) sont situés dans la moitié inférieure du tuyau. Le 8ème trou, pour le pouce, est à une distance double. Tous les trous ont la même grosseur.

Echelle de base :

C'est une flûte à demi-tons
et à partiels.

A musical staff in treble clef showing the scale of the instrument. The notes are: C4 (hole 0), D4 (hole 1), E4 (hole 2), F4 (hole 3), G4 (hole 4), A4 (hole 5), B4 (hole 6), and C5 (hole 7). The notes are marked with circles and stems. Below the staff, the fingerings for each note are indicated by 'T' for thumb and 't' for fingers. The fingerings are: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. The intervals between notes are labeled as T, t, t, t, t, t, t, T+t.

TROUS OUVERTS	0	1	2	3	4	5	6	7	8
INTERVALLES		T	t	t	t	t	t	t	T+t

Etendue, tessiture : La taille étant très fine et les trous situés bas, les partiels sont justes et sortent en grand nombre.

Nbre de tous ouverts : 0 1 2 3 4 5 6 7 8

Partiels utilisables : 7 7 7 6 5 5 4 4 2

On obtient donc l'étendue :
de près de trois octaves (chromatique)

A musical staff in treble clef showing the range of the instrument. The notes are: D03 (260Hz) and D06 (2000Hz). The notes are marked with circles and stems. The range is indicated by a diagonal line from the first note to the last note. The last note is marked with a circled '1' and the text '(P7 de 1)'. The frequency range is indicated as D03 (260Hz) à D06 (2000Hz).

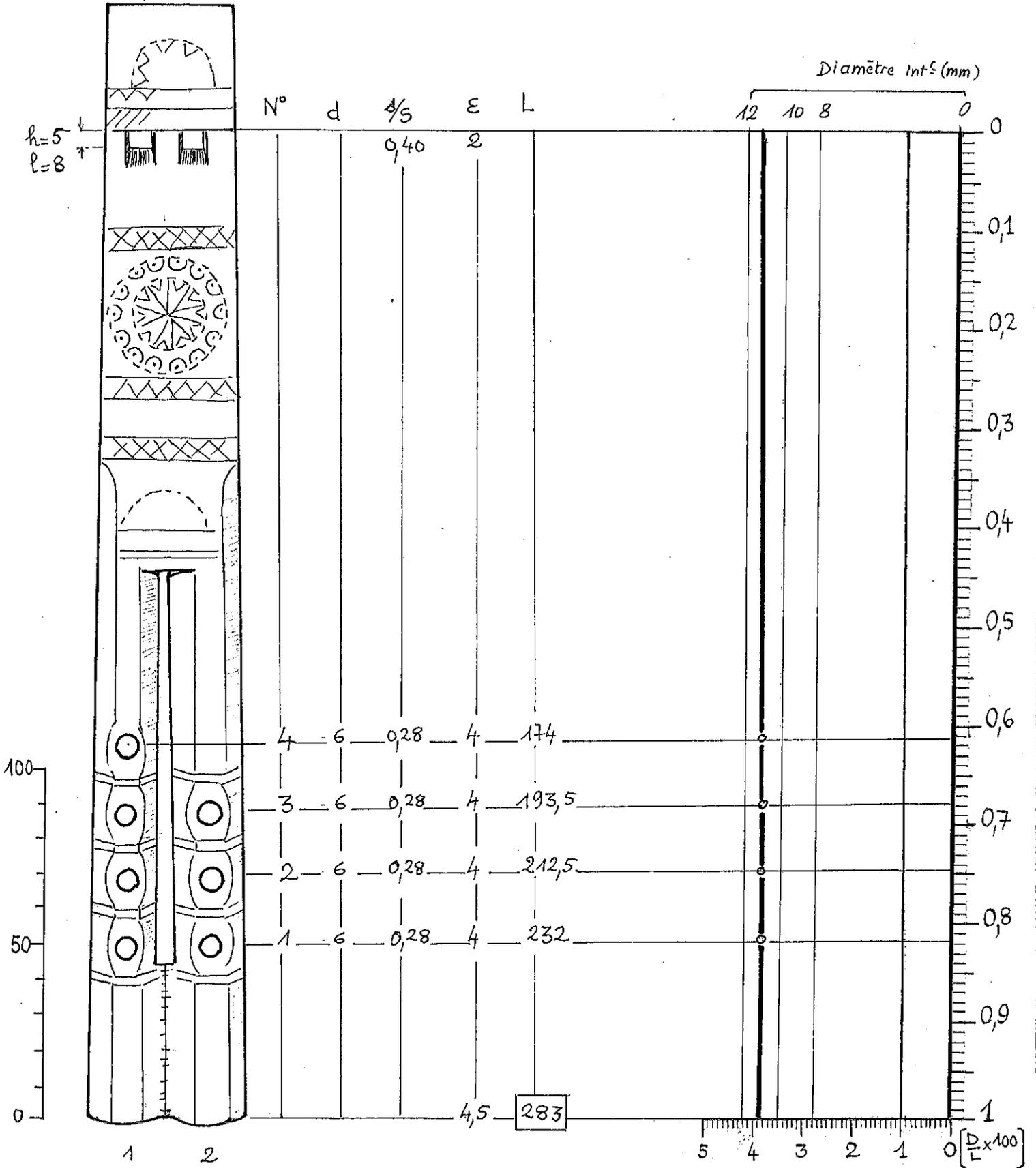
Timbre : L'intensité et le timbre sont modifiables en cours de jeu selon la façon dont le joueur dispose sa lèvre inférieure par rapport à la bouche de l'instrument (cf § 2.65).

Originalité, conclusion : Type de flûte longue à partiels, de taille très fine, dont le bec, modifiable, permet d'utiliser à volonté les sons graves (fondamentaux) et les sons aigus (partiels) ce qui procure une grande étendue.

8. FLÛTE DOUBLE

Entrée $\frac{1}{2} \varepsilon_1 = 3,25$
 $l_1 = 10$

lumière $\varepsilon_2 = 1,2$
 $l_2 = 7,5$



8. FLUTE DOUBLE YOUGOSLAVE

FLÛTE A BEC A 4 TROUS

Fiche N° 8

Origine : Instrument rapporté de Yougoslavie vers 1965.

Epoque : Instrument traditionnel de facture moderne.

Matériau : Bois tourné (?)

Perce, taille : Perce cylindrique
taille moyenne.

Les deux tuyaux sont identiques (même longueur, même diamètre).

Facture : L'instrument est taillé dans un seul morceau de bois.

La technique de réalisation du bec, et en particulier du bouchon permet de diriger convenablement le jet alors que le biseau et la paroi supérieure sont dans le même plan (Cf. Coupe du bec - fiche n° 5).

Trous : Trous identiques et équidistants.

4 trous sur un tuyau, 3 sur l'autre. Les trois premiers trous ont la même position sur les deux tuyaux.

Echelle de Base :

Tuyaux 1 et 2 --- Tuyau 2

TROUS OUVERTS 0 1 2 3 4

INTERVALLES T T T T

Remarque : La tierce basse donnée par l'ouverture du 2ème trou, proche de l'harmonique 5 du son 0 fusionne avec celui-ci lors du jeu polyphonique (fondamental du tuyau 2 tout bouché, en bourdon)

Etendue : La grande surface relative de la bouche permet une bonne justesse des partiels.

On obtient :	Trous ouverts	0	1	2	3	4
	Nbre de partiels	6	3	4	2	3

soit

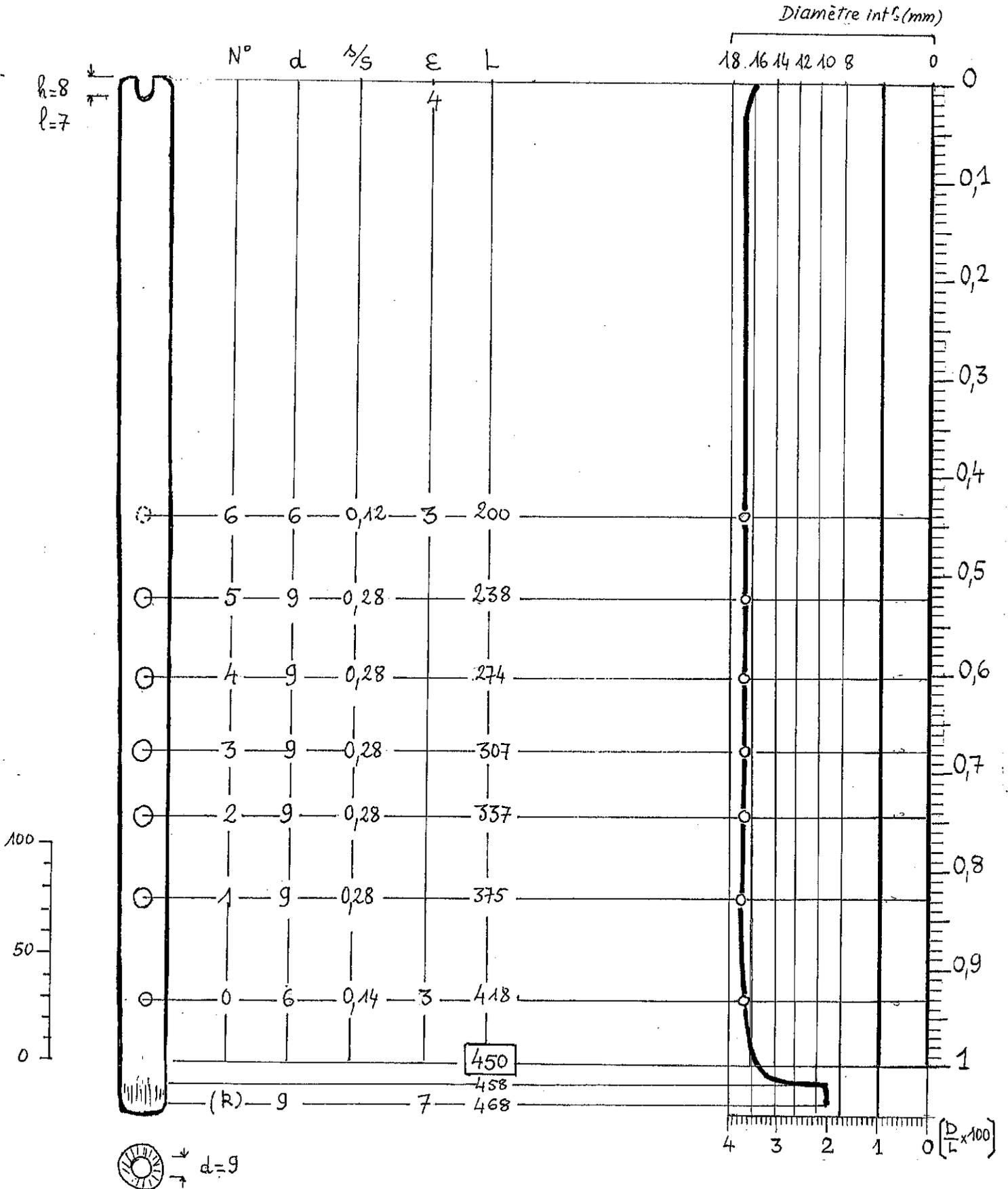
RÉb4 (550 $\frac{1}{2}$) à FA6 (2500 $\frac{1}{2}$)

Timbre : Le jeu polyphonique confère un timbre particulier. D'une part, les bouches étant voisines et alimentées par le même souffle, il se produit, lors des consonances (5te, 8ve; 3ce) une fusion intime des sons. D'autre part, la tessiture favorise la perception des sons différentiels de sorte qu'en jouant 2 tuyaux on peut produire une musique à 3 parties.

En bouchant partiellement l'entrée de l'un des 2 bec avec la lèvre ou la langue, de manière à en diminuer le débit (donc la pression), il est possible de faire fonctionner les 2 tuyaux simultanément à deux régimes différents.

Originalité, conclusion : Instrument d'apparence simple permettant de nombreux effets originaux liés à la possibilité de polyphonie. Le jeu de cet instrument s'accompagne souvent de la pratique du souffle continu : le musicien inspire sans cesser de jouer (donc de souffler) en utilisant une petite réserve d'air dans les joues. Il peut jouer ainsi de façon ininterrompue sur une longue durée.

9. KENA



9. KENA (ARGENTINE)

FLUTE A ENCOCHE A 6 TROUS

Fiche N° 9

Origine : Amérique du Sud (Argentine) - Instrument fait par la maison RICORDI, Buenos Aires.

Epoque : Instrument traditionnel de facture moderne.

Matériau : Roseau.

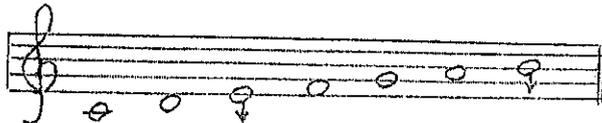
Perce et taille : Perce quasi-cylindrique.
Taille moyenne.

Facture : Pour faire un instrument on coupe le roseau entre deux noeuds. A la partie inférieure le noeud est incomplètement percé, provoquant un rétrécissement dont l'effet est atténué par la présence d'un trou Q restant ouvert en permanence. En réglant l'ouverture de ce trou on accorde aisément le fondamental de l'instrument. A la partie supérieure le noeud est complètement ouvert; l'épaisseur plus importante des parois (plus confortable pour le musicien) et le léger rétrécissement intérieur en conservent la trace. Le biseau de l'encoche est obtenu par amincissement de la paroi à l'intérieur et à l'extérieur.

Trous : 6 trous dont un pour le pouce. Le trou supplémentaire Q reste ouvert en permanence. Il différencie la kena Péruvienne de la Bolivienne qui ne le possède pas (Bib. PANTOJA).

Les 5 trous de la face avant ont le même diamètre, celui du pouce est plus petit. Traditionnellement les trous sont équidistants (§ 3.31). La kena ci-contre, de fabrication commerciale a été corrigée : le 2ème trou est remonté pour agrandir un peu la tierce (T1+T2/T0).

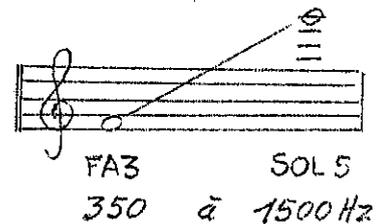
Echelle de base :



C'est la " gamma " de la flûte à 6 trous

TROUS OUVERTS	0	1	2	3	4	5	6
INTERVALLES		T	⊕	⊕	T	T	⊕

Tessiture, étendue : Le partiel 2 sort bien pour tous les fondamentaux de l'instrument et on peut utiliser le 3 des sons les plus graves, ce qui donne un peu plus de deux octaves. Les airs traditionnels dépassent rarement cet ambitus.

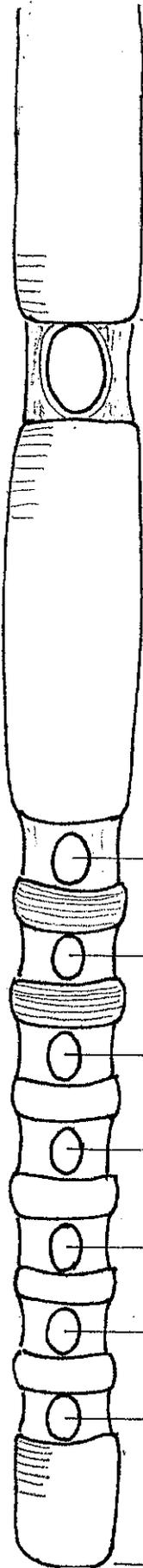


Timbre : Il est largement dépendant du joueur, qui peut obtenir aisément un son riche en harmoniques et de grande intensité, et toutes les nuances voulues.

Autres instruments : Comme beaucoup d'instruments traditionnels la kena se fait en toutes tailles, selon les roseaux. La seule limite aux dimensions de l'instrument est l'écartement des doigts qui détermine la distance maximale entre les trous.

Conclusion, originalité : La kena est la version "à encoche" de la flûte à 6 trous : type fondamental de flûte, répandu universellement. De construction aisée elle offre du fait de son embouchure, d'énormes possibilités d'action sur la hauteur, le timbre et l'intensité.

10. FLÛTE DU THÉÂTRE NÔ



N° d $\frac{\%}{5}$ ϵ L

Diamètre Int^s (mm)
18 16 14 12 10 0

$d_1 = 17$
 $d_2 = 13,5$

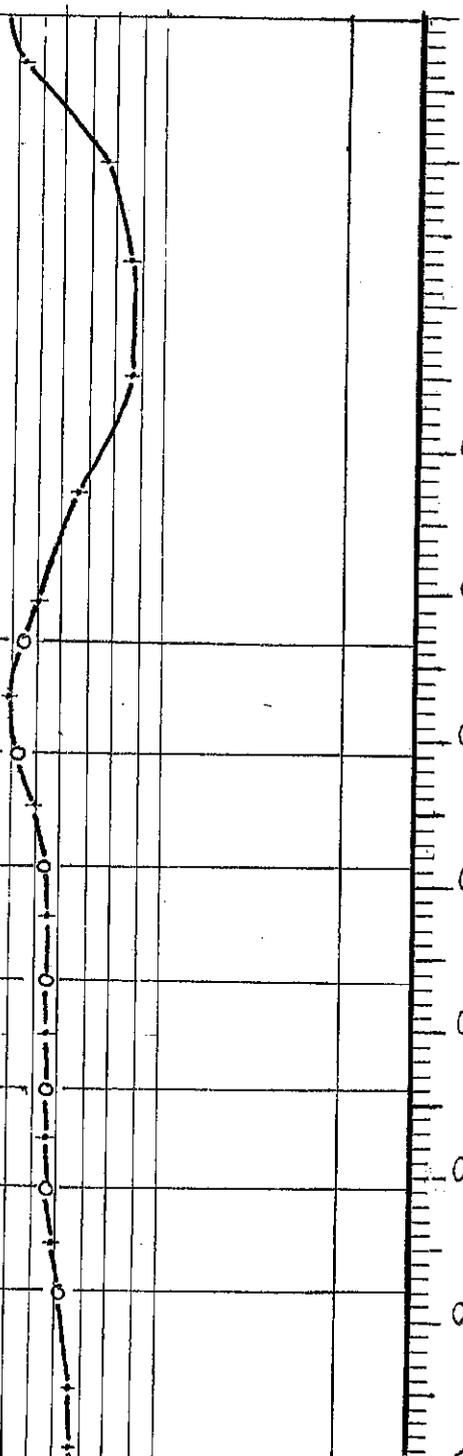
100
50
0

7	8,5x10	0,35	4	125
6	8,3x9,5	0,33		149
5	8,3x9,5	0,37		172
4	8,3x9,5	0,38		195
3	8x9	0,34		215
2	8x10	0,38		235
1	7,8x8,8	0,36		253

4 290

7 6 5 4 3 2 1 0 $\left[\frac{D}{L} \times 100 \right]$

0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1



10. FLÛTE DU THÉÂTRE NÔ (NO-KAN)

FLÛTE TRAVERSIÈRE A 7 TROUS

Fiche N° 10

Origine : Japon

Les mensurations ci-contre sont celles d'un instrument décrit par Y. ANDO (Bib. (5) flûte N° 3); l'étude acoustique a été faite à partir de trois instruments prêtés par A. TAMBA, que nous avons pu examiner en radiographie.

Epoque : Instrument utilisé dans le théâtre nô (XVème siècle) et construit spécialement à cet usage.

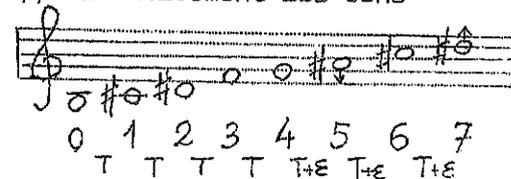
Matériau : Bambou.

Perce : Perce très particulière caractérisée par un étranglement du tuyau au tiers supérieur de l'instrument.
Dans l'ensemble, taille assez grosse.

Facture : Le bambou est fendu longitudinalement en 7 à 8 bandes qui sont retournées, collées et ligaturées après insertion d'un manchon (le nodo) dans le tiers supérieur de l'instrument. La partie située au-delà du trou d'embouchure est emplie de cire ce qui permet au musicien de régler la place du " bouchon ". Elle est de plus lestée de plomb pour équilibrer l'instrument (le centre de gravité se trouvant approximativement à l'endroit du pouce gauche qui soutient l'instrument).

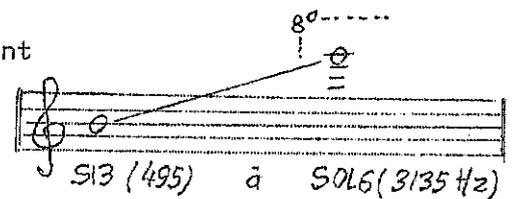
Trous : 7 trous de grande surface, quasi-équidistants.

Echelle de base : L'instrument que nous avons examiné donne approximativement les sons fondamentaux suivants :
mais cette échelle ne correspond pas du tout à la musique jouée, pour plusieurs raisons :



- 1) On n'utilise pratiquement jamais le partiel 1.
- 2) le partiel 2 n'est pas en rapport d'octave (cf. § 3.71)
- 3) Le flûtiste modifie constamment la hauteur des sons par recouvrement de l'embouchure ou des trous latéraux en accord avec l'esthétique musicale du théâtre nô : pas de hauteur fixe, pas d'intervalles " justes ".

Etendue, tessiture : La tessiture musicale de l'instrument est très aiguë (de 500 à 3000 Hz env.)

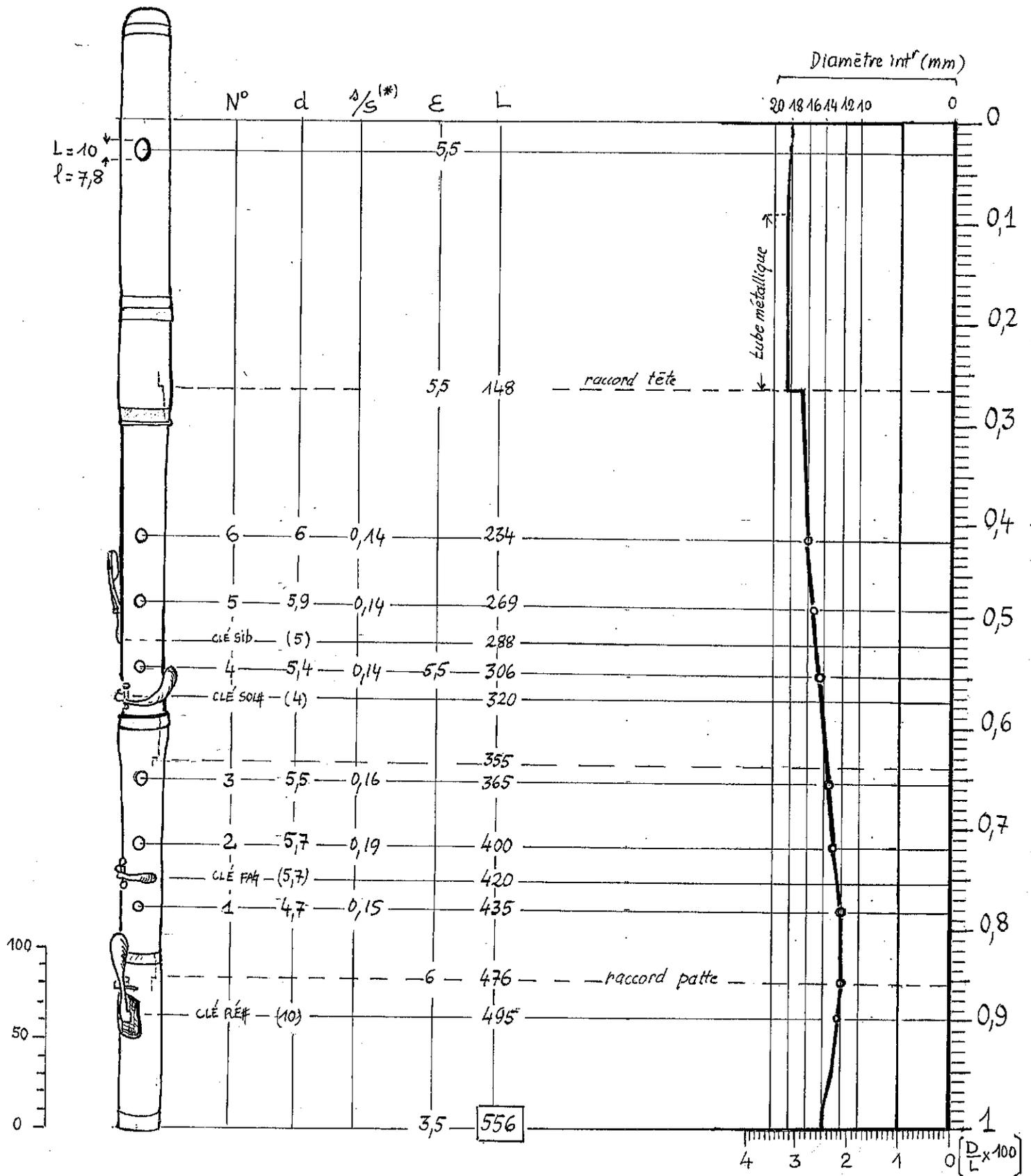


Timbre : Du fait de l'inharmonicité des partiels, les harmoniques sont peu nombreux. L'essentiel de l'intensité est concentré dans le fondamental. Pour cette raison et du fait de la tessiture, la flûte Nô produit une grande intensité et émerge particulièrement bien. (*jeu en plein air*)

Autres instruments : Les dimensions absolues varient d'un instrument à l'autre. Le théâtre Nô ne connaît pas la hauteur absolue! Le seul point important est que tous les instruments aient une perce semblable et des trous situés de façon similaire afin que les intervalles entre les partiels soient conservés. La musique est écrite en tablature et comprend de nombreux doigtés de fourches.

Originalité, conclusion : La flûte Nô est un instrument d'un type tout à fait unique, conçu en vue d'une musique particulière, pour laquelle il est adapté de façon remarquable.

11. FLUTE TRAVERSIÈRE A 4 CLÉS



* Il est difficile d'interpréter s/s en raison des cheminées et de l'agrandissement intérieur des trous ; Quant aux trous munis d'une clé, la levée de celle-ci est déterminante.

11. FLUTE TRAVERSIERE A 4 CLES

Fiche N° 11

Origine : Instrument signé BUFFET, Paris.

Epoque : Début XIXème siècle (?)

Matériau : Bois tourné : buis.

Perce, taille : cylindro-conique terminée par un évasement au delà des trous;
taille d'ensemble, moyenne.

Facture : La réalisation correcte de la perce suppose une bonne maîtrise du métier de tourneur. Le relevé d'instruments anciens réserve souvent des surprises.

Trous : 6 trous de base et 4 trous munis de clés permettant d'obtenir des sons chromatiques sans fourches.
Les trous sont de faible diamètre ($5 < d < 6$ mm); ils sont agrandis intérieurement (cf. § 3.10).

Echelle de base : Pratiquement l'échelle de la flûte à six trous.

Diagram of the first six notes of the flute scale on a treble clef staff. The notes are G4, A4, B4, C5, D5, E5. Fingerings are indicated by numbers 0-5. Intervals are labeled as T (Tone) and # (Sharp).

TROUS	0	1	2	3	4	5	6
OUVERTS	○	○	○	○	○	○	○
INTERVALLES		T	#	#	T	T	T

Les trous munis de clés ne font pas partie de l'échelle de base car en dehors de leur utilisation pour une note donnée ils restent fermés

Etendue, Tessiture :

Diagram of the flute's range and tessitura on a treble clef staff. The staff is divided into two parts: PARTIEL 1 (first octave) and PARTIEL 2 (second octave). Notes are shown with fingerings and key signatures. A bracket indicates that notes 6 and above are played like the first octave.

0 clé ré# 1+ clé ré# 2+ clé fa# 3 clé sol# 4+ clé sib 5 f 6 [comme la 1ère octave]

fourches pouvant différer selon les instruments

Il s'agit de clés fermées

RE₃ (300 Hz)

ã

SOL 5 1500 #

Deux octaves + une quinte par degrés chromatiques.

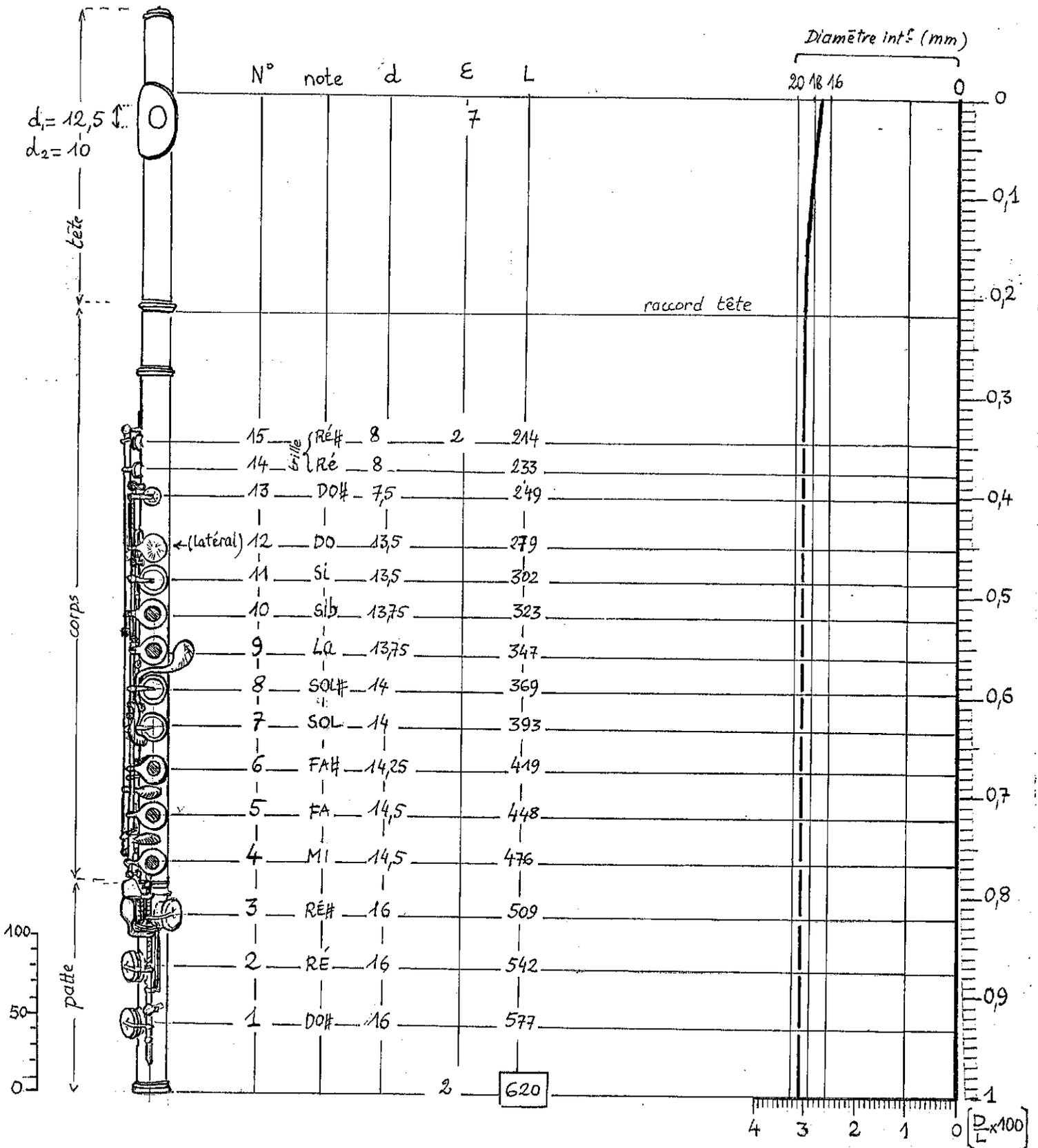
La deuxième octave utilise le partiel 2 quasi intégralement (les doigtés sont les mêmes que ceux de la première octave). Au delà les fourches se compliquent et il faut beaucoup corriger la justesse à l'embouchure.

Timbre : La perce conique, l'utilisation de fourches et la faible surface des trous contribuent à produire un timbre particulier " doux, chaud, velouté " où la fondamental prédomine largement; toutefois les particularités individuelles anatomiques du joueur entrent pour une bonne part dans le timbre.

Conclusion : La flûte traversière baroque diffère fondamentalement de la flûte à bec de la même époque sur deux points :

- le système des 6 trous de base est intégralement octaviant.
- les paramètres de l'excitation sont réglables par le musicien, ce qui permet de corriger la justesse, et de régler l'intensité, la hauteur et le timbre de façon indépendante.

12. FLUTE TRAVERSIÈRE BOEHM



12. FLUTE TRAVERSIERE SYSTEME BOEHM

FLUTE TRAVERSIERE A 13 (+2) TROUS

Fiche N° 12

Origine : France - Instrument fabriqué par COUESNON.

Epoque : Instrument moderne mis au point au XIXème siècle.

Matériau : Métal : Maillechort argenté.

Perce : Conico-cylindrique (cf. § 3.67).

Taille - fine : Le diamètre diminue graduellement de 19 à 17 mm dans le quart supérieur du tuyau. Cette contraction du tuyau près de l'embouchure favorise l'émission des partiels élevés et les rend plus aigus, ce qui permet de compenser le recouvrement plus grand de l'embouchure dans l'aigu (cf § 2.61).

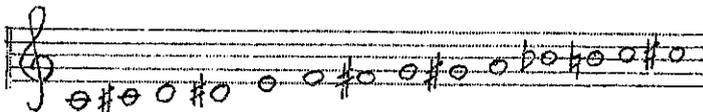
Facture - Semi-industrielle : Le tube, les cheminées des trous, les clés sont de fabrication industrielle. La tête (perce intérieure, forme du trou d'embouchure) est plus ou moins travaillée à la main.

Trous : 13 trous de base + 2 trous de trille.

De grandes dimensions, les trous couvrent les 2 premiers tiers de l'instrument. Ils sont espacés régulièrement, leur distance diminuant au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'embouchure.

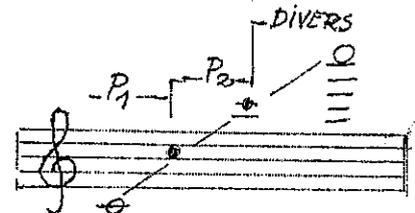
Un système complexe de clés couplées permet, en utilisant 9 doigts (5 de la main gauche + 4 de la main droite) de boucher ou déboucher 16 trous. La cléterie assure principalement la commande à distance et le couplage de certains trous. Sur l'instrument ci-contre les trous 4,5,6,9 et 10 sont munis d'anneaux.

Echelle de base :



TROUS OUVERTS 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
INTERVALLES t t t t t t t t t t t t t

L'instrument est intégralement chromatique



D03 260 Hz à D06 2100 Hz

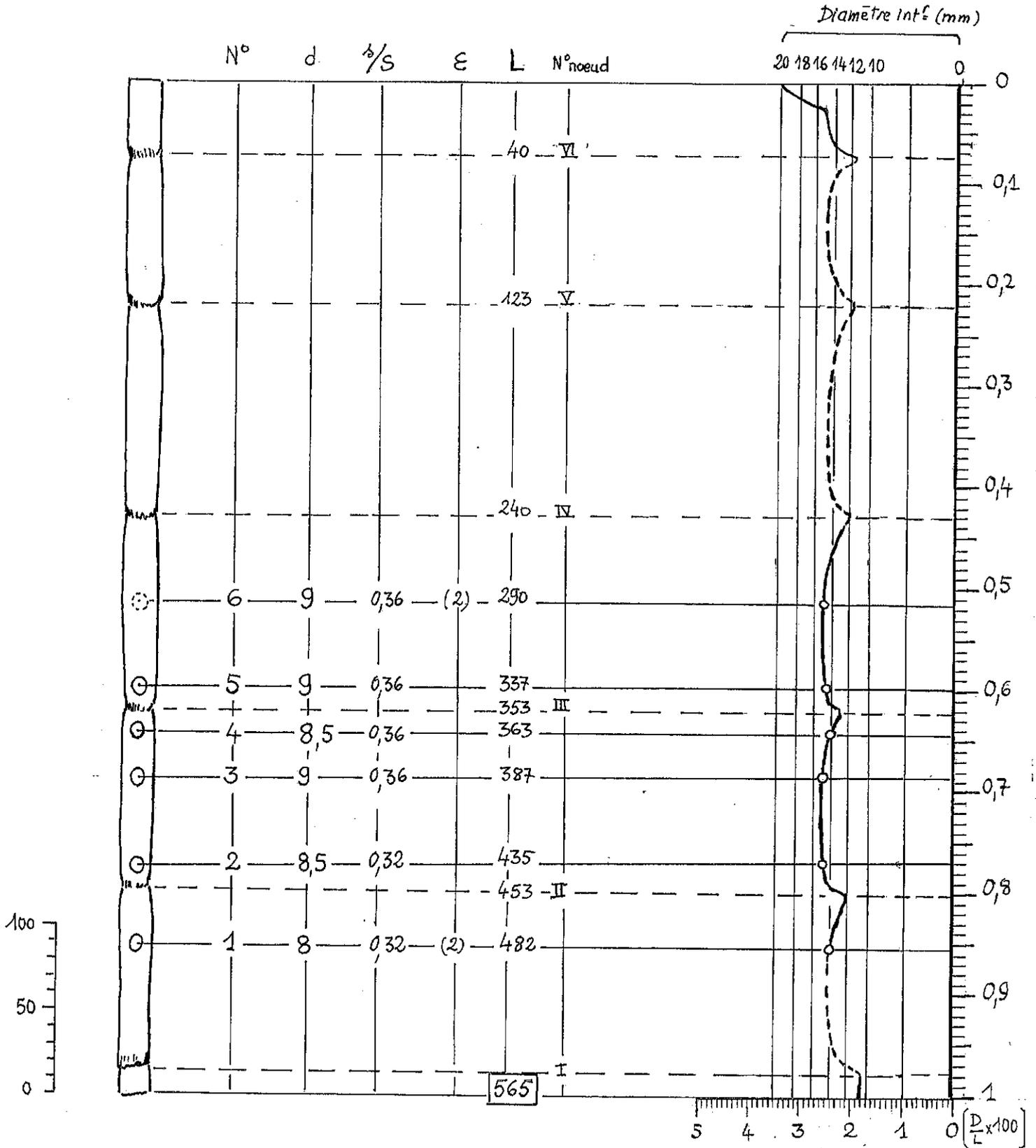
Etendu, tessiture : La deuxième octave utilise le partiel 2 des fondamentaux (sans fourches). La troisième octave fait appel aux partiels 3 et 4 avec quelques fourches.

Timbre : La justesse des partiels permet d'obtenir un grand nombre d'harmoniques, d'où un timbre plus clair que la flûte baroque. Mais la sonorité dépend en définitive beaucoup du musicien.

Autres instruments : La famille ordinaire des flûtes traversières de l'orchestre comprend un instrument à l'octave aiguë de celui-ci (le Piccolo) et 2 instruments plus graves, la flûte alto (fondamental Sol2) et la flûte basse à l'octave inférieure de l'instrument décrit.

Conclusions : Issue des recherches conjuguées de BOEHM, GORDON, GODFROY, cette flûte est un instrument hautement spécialisé, mécaniquement adapté à la musique tonale européenne en ce qui concerne la justesse, la virtuosité et l'intensité. Comme le musicien règle les paramètres de l'excitation elle permet également d'intéressantes recherches en musique contemporaine (polyphonie).

13. NEY IRANIEN



13. NEY IRANIEN

FLUTE OBLIQUE A 6 TROUS

Fiche N° 13

Origine : Iran

Epoque : Instrument traditionnel construit en 1971 par Hassan NAHID, musicien.

Matériau : Roseau

Taille : Très fine.

Perce : De même que pour le ney Turco arabe la perce est régulièrement rétrécie aux endroits des noeuds. Le diamètre moyen diminue légèrement de l'embouchure vers l'extrémité inférieure.

A l'embouchure le roseau est évidé intérieurement de façon que le bord, aminci soit presque tranchant. Pour empêcher qu'il soit ébréché on garnit souvent l'extrémité supérieure d'un manchon métallique très mince, extérieur, qui constitue alors le bord réel du tuyau.

Facture : Le problème essentiel consiste à trouver un bon roseau. Il doit avoir 6 noeuds régulièrement espacés.

Le roseau est coupé un peu au dessous du 1er noeud et à mi-distance entre le VIème et le VIIème noeud.

Trous : 6 trous de grande surface et de diamètres comparables entre eux. Le dernier trou est au milieu du tuyau.

La distance entre les trous 1,2,3 et 5 croît régulièrement.

Enfin il est frappant de constater que le 1er et le dernier trou ont, par rapport à la longueur totale du tuyau la même position que sur le ney turco-arabe.

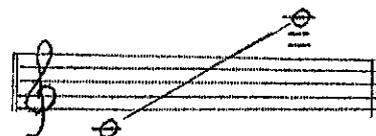
Echelle de base :



TROUS OUVERTS 0 1 2 3 4 5 6

INTERVALLES T T t t t 2T

Echelle mixte : à tons et à demi-tons.



D03

M15

250 Hz à 1300 Hz

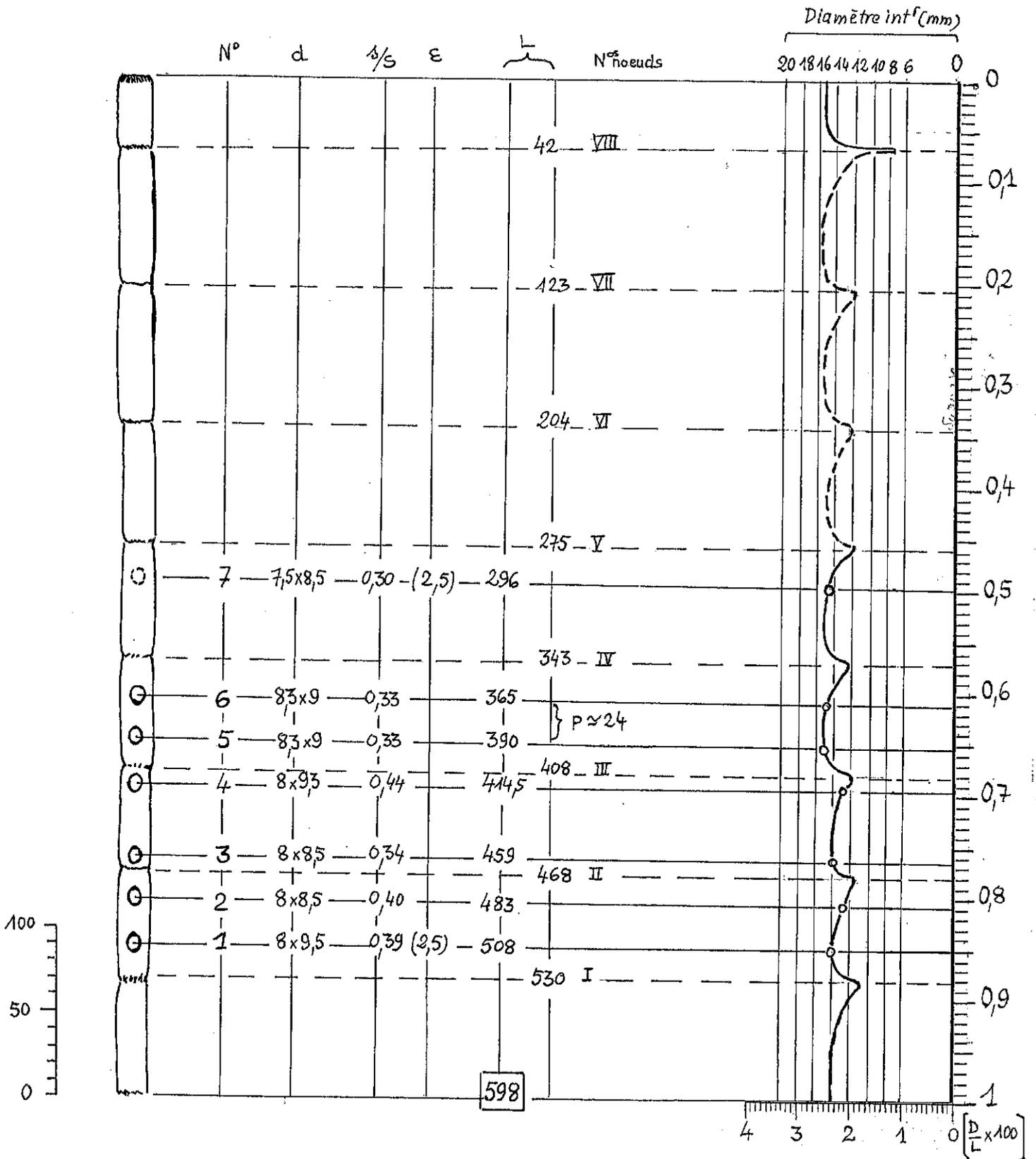
Etendue, tessiture : On utilise jusqu'au partial 5
Pour tester la justesse, le musicien ~~utilise~~ *utilise* ~~de~~ *de* ~~next~~ *next*
lies des correspondances entre partiels
(cf. § 3.38).

Timbre : Les musiciens iraniens utilisent deux techniques d'émission : le jeu extérieur (cf. § 2.32) que l'on rencontre communément dans les flûtes obliques, avec lequel il est plus facile d'émettre les partiels aigus, et le jeu à l'intérieur de la bouche qui produit beaucoup de souffle et favorise plus spécialement les sons graves (fondamentaux).

Autres instruments : On peut construire des neys de toutes dimensions, à condition de respecter les proportions (diamètre/longueur, nombre de noeuds, position des trous par rapport aux noeuds).

Conclusion : Basé sur un système différent du ney turco-arabe cet instrument représente également une solution remarquable pour obtenir avec un matériau naturel un instrument qui peut être d'une justesse " parfaite " en tirant parti des irrégularités de perce du roseau. Il représente sans doute l'aboutissement de plusieurs siècles d'expérience.

14 ° NEY TURCO - ARABE



14. NEY, TURCO ARABE

FLÛTE OBLIQUE A 7 TROUS

Fiche N° 14

Origine : Tunisie

Epoque : Instrument traditionnel

Matériau : Roseau

Taille : très fine

Perce: La perce peut varier selon le roseau utilisé mais on observe certaines constantes : le diamètre du roseau va en décroissant depuis la base (racines) jusqu'à l'extrémité. On taille l'embouchure du côté le plus gros. L'allure générale de la perce est donc conique. Le noeud le plus proche de l'embouchure n'est pas complètement percé de façon à réaliser un diaphragme (cf. § 3.35). Les autres noeuds sont entièrement ouverts, mais il subsiste toujours des étranglements du roseau à leur endroit.

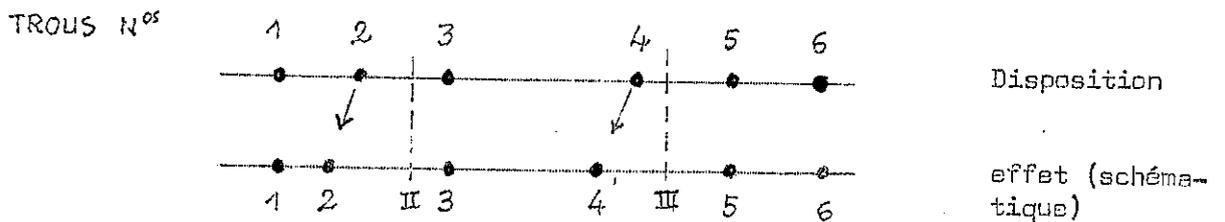
En pratique nous n'avons pu mesurer le diamètre intérieur qu'aux extrémités et à chaque trou; le tracé ci-contre est en partie reconstitué (en traits interrompus).

Facture : Le problème le plus difficile consiste à trouver un roseau convenable, offrant des noeuds régulièrement espacés et tels que le diamètre moyen du roseau soit petit par rapport à la longueur prise entre 8 noeuds.

Trous : Les trous ont théoriquement les mêmes dimensions mais l'instrument ci-contre présente des irrégularités (le 7ème trou est plus petit). Les 6 premiers trous sont disposés symétriquement par rapport au milieu de la troisième phalange. Le module (p) (équidistance), de l'ordre de 25 mm est double entre les trous 3 et 4 et triple entre 6 et 7.

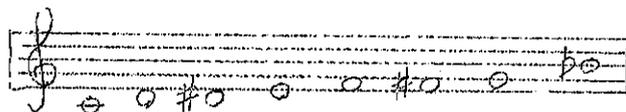
Il en résulte que les trous 2 et surtout 4 sont situés immédiatement sous un rétrécissement ce qui a pour effet d'agrandir plus particulièrement l'intervalle qu'ils font avec le trou supérieur.

Tout se passe comme si les trous 2 et 4 étaient en fait placés plus bas.



On obtient bien un demi-ton entre 3 et 4 alors que la distance est double. De même l'intervalle 1 à 2 qui, sans diaphragme aurait tendance à être trop grand, est réduit (cf. § 3.36 à 3.39).

Echelle de base :



TROUS OUVERTS 0 1 2 3 4 5 6 7
INTERVALLES T t t t t T+t

Les 6 premiers trous couvrent une quinte; le trou du pouce permet d'étendre jusqu'à la 7ème mineure.

Etendue : Les partiels sont utilisables jusqu'au N° 5. L'étendue totale est d'environ deux octaves et une 5te,

La tessiture de cet instrument va de 250 Hz à 1500 Hz



D03 250 Hz à G04 1570 Hz

Timbre : Réglé par le musicien qui maîtrise complètement l'excitation, le timbre est grandement dépendant du joueur. En principe, seul le jeu extérieur est utilisé. D'une façon générale, les fondamentaux sont de faible intensité. A noter que les musiciens recherchent souvent une émission donnant simultanément le fondamental et le partiel 2.*
(jeu "enroué")

Autres instruments : Les principes de facture établis empiriquement permettent de construire un instrument quelles que soient ses dimensions absolues, le module de base étant l'espace entre deux noeuds. Un jeu complet comprend classiquement 8 neys, le dernier ayant une longueur double du premier.

Conclusion : Instrument type issu d'une longue tradition représentant une utilisation musicale remarquable du matériau naturel, le roseau, telle qu'en tenant compte des irrégularités statistiquement reproductibles on aboutisse à une justesse quasi parfaite des partiels, vérifiable par les correspondances entre ceux-ci (cf. § 3.38).

* C'est le jeu "enroué"

CHAPITRE III

LA JUSTESSE DES FLÛTES

§ 4.23 - Généralités

Avec un tuyau de longueur donnée, on dispose de deux moyens pour produire des sons de hauteur différents : l'utilisation des partiels du tuyau et le débouchage de trous latéraux.

Un musicien habile peut, en agissant sur le recouvrement des trous ou en modifiant les paramètres de l'excitation, jouer sur un tuyau quelconque une mélodie de hauteur définie avec beaucoup de précision : c'est uniquement un problème d'habileté et d'entraînement. Cependant si la musique du lieu utilise des sons d'une échelle déterminée, le jeu du musicien sera plus aisé et plus agréable sur un instrument construit de façon à fournir, avec le moins de corrections possible, les intervalles de cette musique. Les instruments traditionnels représentent généralement le meilleur compromis possible entre les impératifs anatomo-physiologiques, les contraintes de la facture et les exigences de justesse et de timbre demandées à la flûte.

Pour juger de la justesse d'un instrument il faut :

- connaître l'échelle de référence admise par les musiciens du lieu et de l'époque,
- être en mesure d'apprécier l'écart entre les sons fournis par l'instrument lors de son utilisation normale, et la référence considérée comme l'idéal à atteindre. Cette opération apparemment simple présente en fait beaucoup de difficultés.

Tout d'abord la référence est souvent difficile à connaître. Elle peut même faire défaut comme dans la musique du théâtre Nô où la flûte, écrite en tablature, doit seulement respecter l'allure mélodique et temporelle de schémas transmis oralement, sans qu'il soit question de notes musicales ni même d'intervalles.

Si il s'agit d'un instrument ancien il faudra agir avec prudence pour retrouver, par recoupement de diverses sources la référence applicable de façon probable à cet instrument. (En fait on ne saura jamais ce que les usagers d'une flûte "oubliée" tiraient de leur instrument...).

Cette référence connue, le problème n'est pas résolu pour autant; il faut mettre au point une méthode de test de l'instrument et confronter les résultats avec l'avis du musicien, seul juge en dernier ressort.

§ 4.24 - Test des instruments

Le test fondamental est le champ de liberté des hauteurs établi de préférence par le musicien qui en joue habituellement. De cette façon, on se place dans les conditions normales d'emploi de l'instrument (température, humidité). Si l'on ne dispose pas du musicien habituel il est indispensable de faire établir le champ de liberté au moins par 2 musiciens différents, surtout si l'instrument est à excitation réglable.

En portant sur un diagramme les écarts de chaque note en plus ou en moins

par rapport à la référence choisie, on obtient l'étendue des sons possibles sur l'instrument. Si la référence traverse toutes les notes on peut en conclure qu'il est possible de jouer " juste " sur cet instrument.

Le champ de liberté étant souvent très large il est nécessaire de cerner à l'intérieur une bonne zone, celle où l'émission est la plus facile, la plus sûre et que l'on peut considérer comme la meilleure. Pour cela on peut demander plusieurs essais au musicien :

- 1) jouer au hasard des notes isolées en cherchant pour chacune la meilleure sonorité,
- 2) jouer une succession de quintes, d'octaves... en les ajustant,
- 3) jouer des extraits musicaux dans deux tonalités éloignées (par exemple Fa Majeur et Si mineur) et mesurer la hauteur des sons de l'enregistrement.

Ces mesures, reportées dans le champ de liberté permettent alors de définir le " coeur " du champ de liberté correspondant à l'utilisation la plus courante, pour finalement mieux apprécier la justesse de l'instrument.

§ 4.25 - Flûte traversière. Un même instrument joué par 2 musiciens.

La nécessité de restreindre l'étendue du champ de liberté en fréquence pour juger d'un instrument est montrée dans l'expérience suivante.

Sur un instrument comme la flûte traversière le champ de liberté en fréquence atteint facilement un demi-ton. D'une part, les moyens de réglage à l'embouchure sont assez importants et d'autre part l'estimation des limites supérieure et inférieure comporte une part d'arbitraire, car l'expérience est assez fastidieuse et le musicien a du mal à juger de la qualité du son. Si la flûte est " à peu près juste " à l'oreille il est impossible de déceler ses petits défauts éventuels.

fig.5

On voit fig.5 le champ de liberté en fréquence d'une flûte traversière à 1 clé jouée par 2 musiciens professionnels. La variation en fréquence est de l'ordre de 20 savarts pour la plupart des notes, avec le musicien A; elle atteint et dépasse couramment le demi-ton avec le musicien B. Portons dans ce champ de liberté les mesures effectuées au cours des opérations 1) 2) et 3) mentionnées au paragraphe précédent. On voit que les points se regroupent près du bord supérieur du champ de liberté sans pour autant le suivre régulièrement.

En comparant maintenant les diagrammes (A) et (B) dont on ne conserve que la partie significative on peut reconstituer un champ de liberté restreint (C)* qui correspond aux sons effectivement utilisés dans le jeu courant. Il est bien entendu que le reste du champ de liberté peut être exploité lors d'effets expressifs particuliers ou lorsque le flûtiste doit s'accorder sur un autre instrument. Les notes hautes par rapport à la référence (fa³ et 4, Sol^{#3}, la⁴) ou basses (fa^{#3}, fa^{#4}, Si⁴ et Do^{#5}) apparaissent clairement.

Notons au passage que le musicien B joue en moyenne 3 à 4 savarts plus haut que A . Ceci provient de la technique d'embouchure.

§ 4.26 - Flûtes à bec - Champ de liberté en fréquence et justesse de l'exécution musicale

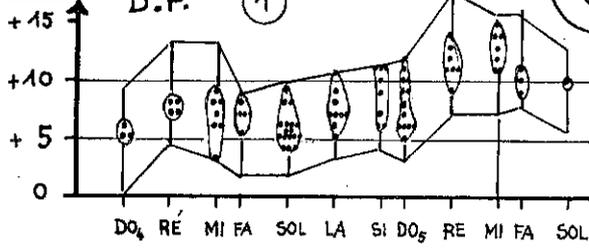
La flûte à bec offre beaucoup moins de possibilités de correction que la flûte traversière; fréquence, intensité et timbre étant étroitement liés toute correction de hauteur se fera au détriment des deux autres paramètres.

* à la partie inférieure de la figure 5

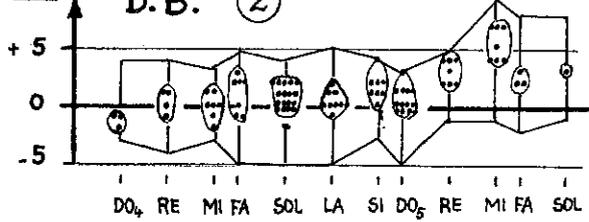
...../

6

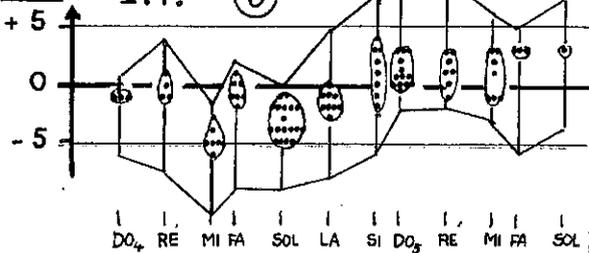
SAVARTS



SAVARTS



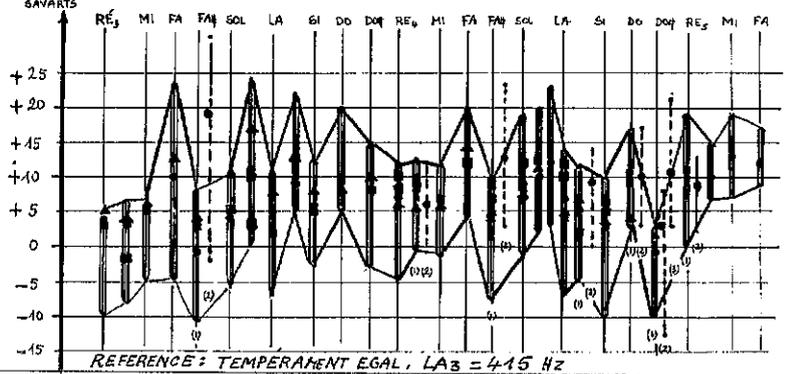
SAVARTS



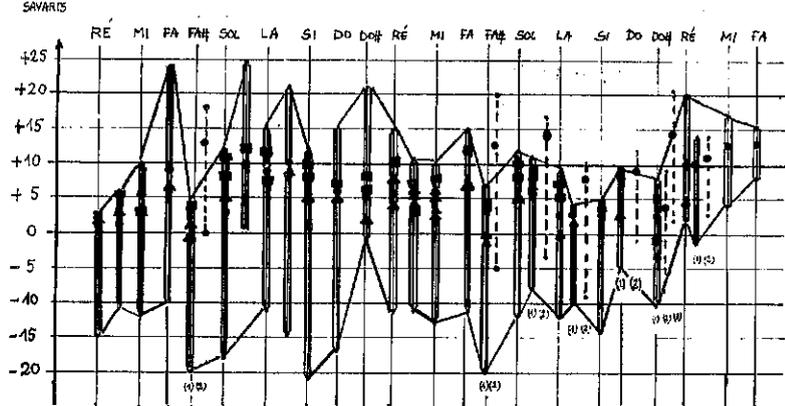
5

FLUTE TRAVERSIERE A 1 CLÉ - Champ de liberté en fréquence

30 à 15 A FLUTE GRENSER (P.S.) : PIERRE SECHET Bouchon: 19mm T° = 18°
Doigtés séché

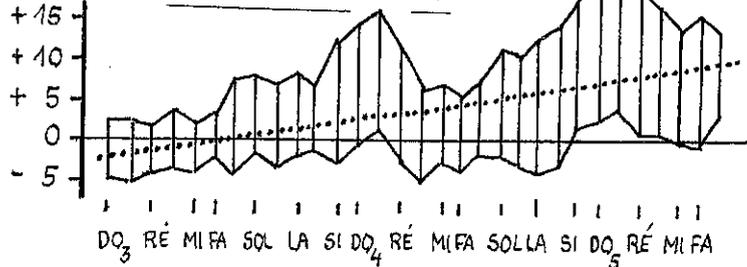


B FLUTE GRENSER (P.S.) : PHILIPPE SUZANNE Bouchon: 19mm T° = 18°
Doigtés séché



RÉFÉRENCE: TEMPÉRAMENT ÉGAL LA₃ = 440 HZ

SAVARTS flûte traversière BOEHM



7

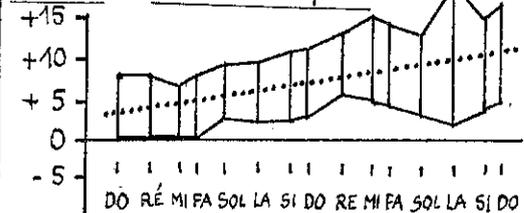
SAVARTS

flûte à bec alto



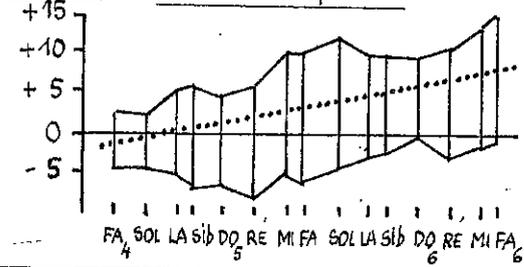
SAVARTS

flûte à bec soprano



SAVARTS

flûte à bec sopranino



S'il n'a pas recours aux débouchage partiel des trous le musicien sera donc largement dépendant de l'instrument en ce qui concerne la justesse; l'expérience suivante en témoigne.

Soient 3 flûtes à bec soprano du commerce. Ces instruments doivent en principe permettre de jouer au moyen de doigtés convenus fournis avec l'instrument, les notes d'une gamme tempérée au diapason habituellement admis de 440 Hz.

fig.6

En laissant au musicien le temps de connaître l'instrument et de le chauffer, nous lui demandons de jouer sur chacune d'elles une mélodie simple dans le ton ordinaire de ces flûtes : Do majeur. Puis nous mesurons la fréquence de toutes les notes de la mélodie et nous reportons les résultats sur le champ de liberté établi antérieurement par le même musicien. On voit aisément (fig.6) que la " justesse " du musicien est en fait celle de l'instrument. Il y a une étroite correspondance entre les déviations des points de mesure relevés en cours de jeu et les limites du champ de liberté en fréquence.

Il serait donc important, lorsqu'on se propose d'utiliser des flûtes à bec pour l'éducation musicale des enfants de choisir soigneusement les instruments qu'on leur donne. Une classe conditionnée à l'instrument (3) jouera la 5^{te} Do-Sol plus courte et la 5^{te} Mi-Si beaucoup plus grande que la 5^{te} tempérée!

Enfin on peut penser qu'il serait raisonnable d'amener les fabricants à tester les instruments qu'ils mettent en vente en employant la méthode décrite, ce qui pourrait éviter de perpétuer la fabrication d'instruments ayant des défauts de justesse.

§ 4.27 - Justesse physique et justesse perçue - (problèmes de perception de la hauteur)

Lorsqu'on dispose du champ de liberté en fréquence d'un instrument, complété par la zone centrale, le problème n'est pas résolu pour autant car il faut interpréter les résultats en fonction des propriétés de l'oreille.

Lorsqu'on examine plusieurs champs de liberté en fréquence d'instruments considérés comme justes par les musiciens, on est surpris de constater une tendance commune : l'allure ascendante des graphiques (fig.7) : les sons les plus aigus de l'instrument sont un peu hauts par rapport au grave.

STEVENS et DAVIS ont les premiers attiré l'attention sur le fait que l'octave supérieure d'un son sinusoïdal aigu, par exemple 1000 Hz, devait être plus grande que l'octave physique pour être acceptée comme " juste ". Le phénomène est d'autant plus accusé que le son est plus aigu.

Depuis, de nombreux chercheurs ont expérimenté sur ce sujet, (cf bibliographie de l'article de SUNDBERG et LINDQVIST, 1973) et leurs résultats semblent confirmer l'agrandissement des intervalles aigus. Nous avons nous-même fait une série d'essais avec des musiciens en explorant plus en détail la zone 500-2500 Hz exploitée par les flûtes. Les résultats tendent à montrer que chaque individu possède une courbe de justesse particulière dépendant des propriétés de son oreille et de son conditionnement musical (Bib. M. CASTELLENGO - n° 11). Sur 7 musiciens, 2 raccourcissent l'octave entre 1800 et 2300 Hz ! Les problèmes sont donc plus compliqués que ne le laissaient prévoir les résultats des auteurs antérieurs, mais on peut dire, en première approximation, qu'une flûte dont l'aigu est un peu plus haut que ne le veut la théorie, a des chances de satisfaire un plus grand nombre de musiciens.

Un autre facteur important de la perception de la hauteur est le timbre. Sur un instrument comme la flûte traversière à 1 clé ou la flûte à bec baroque, les sons de fourche dont le timbre est dépourvu d'harmonique 2 sont perçus différemment; le fait de recouvrir moins de trous, ou d'ouvrir la clé modifie peu la fréquence, mais change

le timbre, donc la hauteur perçue. Finalement chaque auditeur perçoit les hauteurs différemment, ce qui pose souvent bien des problèmes de justesse en musique mélodique.

§ 4.28 - Conclusion

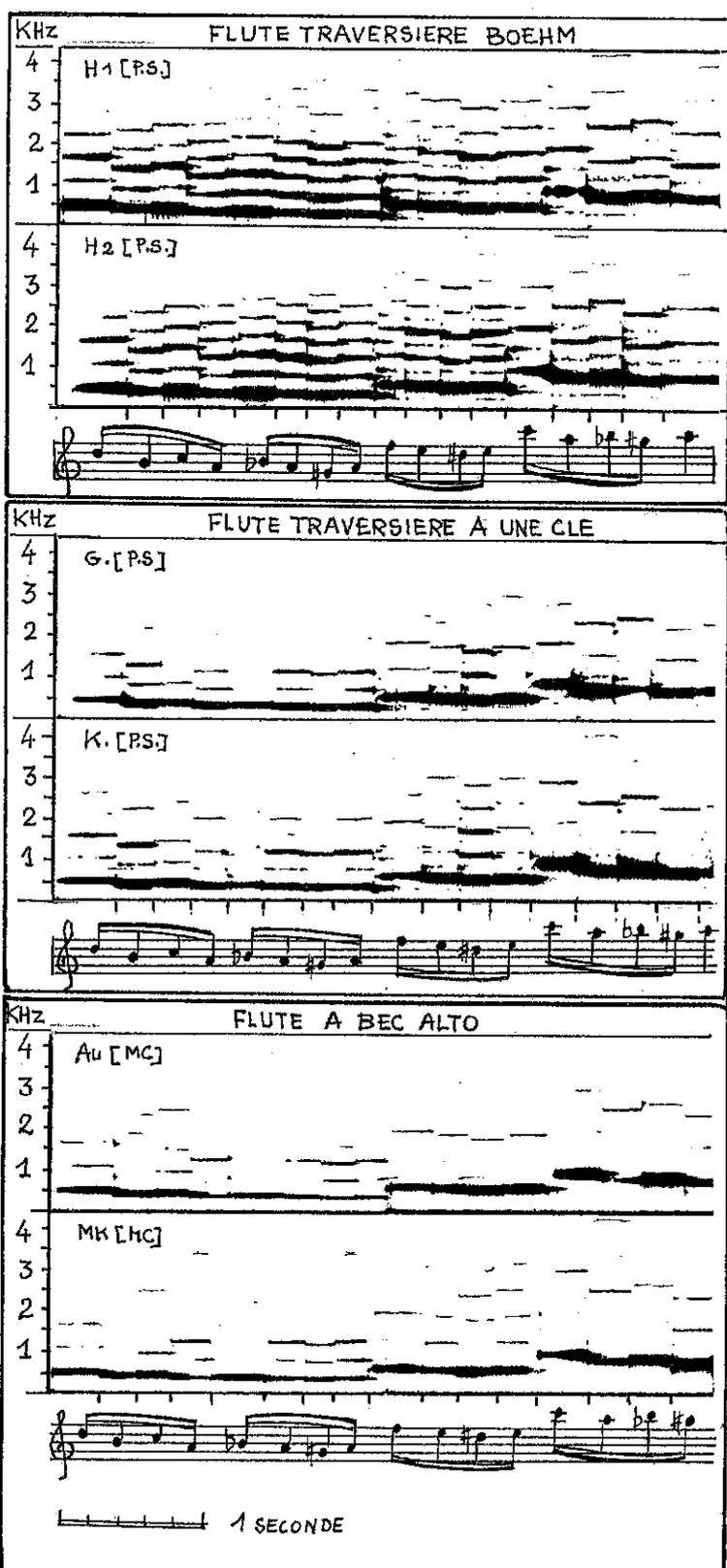
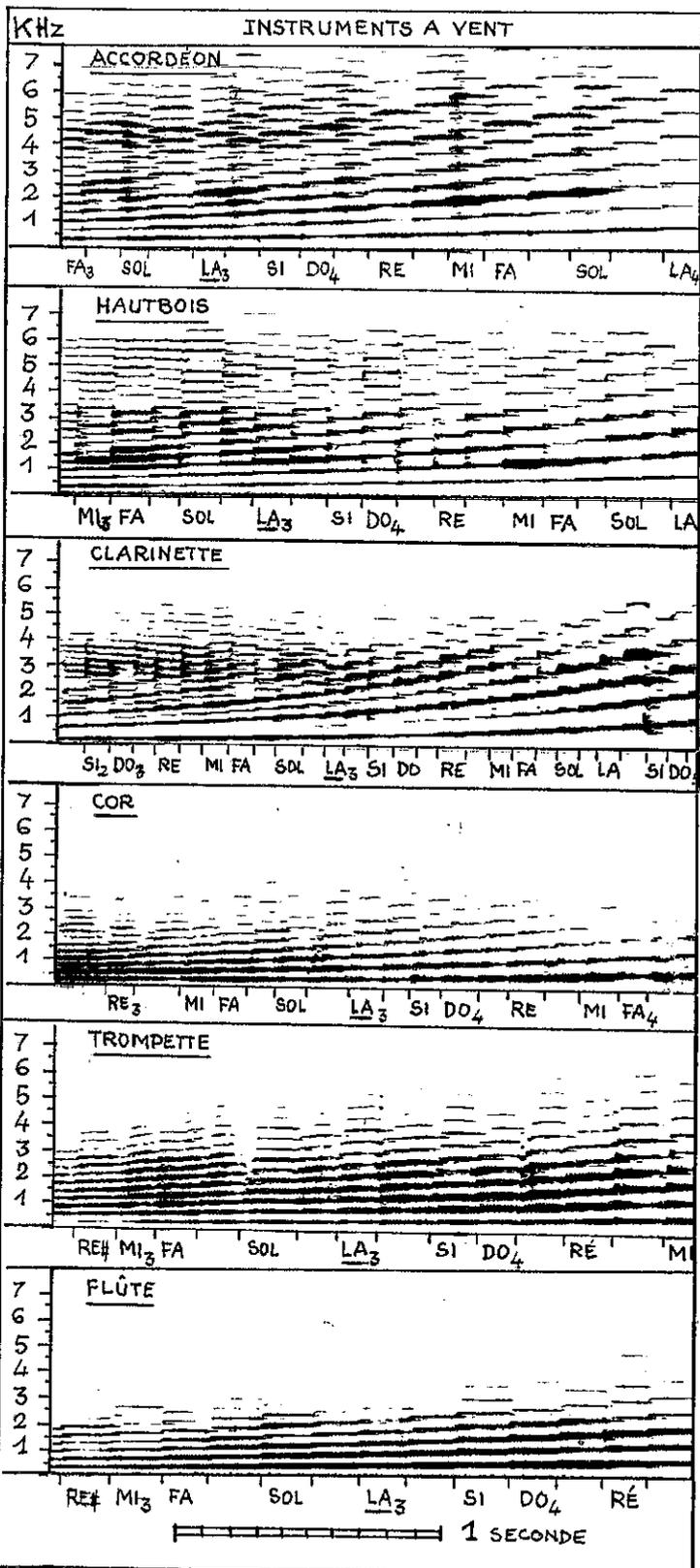
En musique harmonique la hauteur des sons peut être ajustée de façon objective et précise grâce au phénomène des battements. Si l'instrument est à sons entretenus, (orgue) les musiciens se mettent généralement d'accord sans trop de problème. On atteint d'ailleurs à l'oreille une précision de réglage largement supérieure à celle des compteurs électroniques courants, et l'ajustement est beaucoup plus rapide.

En musique mélodique la tolérance de l'oreille est grande mais les paramètres qui modifient la hauteur perçue sont nombreux et de surcroît variables d'un individu à l'autre. Toutefois, les musiciens étant amenés à jouer les uns avec les autres, ce sont finalement les instruments à clavier qui deviennent la référence de fait; en occident aujourd'hui, c'est le tempérament pseudo-égal du piano.

La flûte est un instrument à sons variables. Quand les paramètres de l'excitation sont réglables par le musicien, c'est lui qui décide largement de la hauteur des sons produits, donc de la justesse. QUANTZ (Ch. IV - § 4) pose clairement le problème pour la flûte traversière à 1 clé : " Pour entonner chaque ton net, en passant de l'un à l'autre, il faut avoir l'embouchure ferme et sûre, l'oreille faite à la musique, et une connaissance des proportions que les tons ont entr'eux. Celui qui joint à ces qualités celle de bien jouer de la flûte, est en état de rendre une flûte bonne et bien accordée

Lorsqu'il s'agit d'une flûte à bec nous avons montré que le musicien adoptait en fait plus ou moins consciemment l'échelle fournie par l'instrument. Il est donc important de pouvoir contrôler celle-ci.

Le champ de liberté en fréquence, complété par les mesures de hauteur effectuées en cours de jeu normal, permet seul de décider de la justesse effective de l'instrument, compte tenu de la sonorité et de la facilité d'émission des sons. On peut, de ce fait, le raccorder facilement avec la réalité instrumentale.



Gammes chromatiques ascendantes (legato)

8

Une même mélodie jouée sur 3 types de flûtes

15

CHAPITRE IV

TIMBRES DES FLÛTES

§ 4.29 - Le timbre - Définitions

Selon la définition classique, toujours recevable, le timbre est la qualité qui permet de distinguer deux sons ayant même hauteur et même intensité.

Cette " qualité " est en fait une notion complexe qui fait intervenir d'une part les grandeurs physiques : fréquence, intensité, durée, d'autre part les données perceptives puisque le timbre se définit comme une qualité perçue. Il faut donc interpréter les données physiques en fonction des propriétés de l'oreille qui sont non-linéaires et variables d'un individu à l'autre. Mais surtout il faudrait connaître mieux les mécanismes auditifs présidant au jugement sur les timbres. On sait que le traitement de l'information acoustique par notre cerveau procède par comparaison (cf. LEIPP (7)), un événement nouveau étant analysé par rapport à un événement similaire déjà stocké en mémoire (extraction des points communs, des points originaux). Ainsi un musicien définit généralement le timbre d'un instrument en se référant à celui auquel il est le plus habitué. On comprend que l'étude du timbre soulève bien des difficultés.

Selon le type de comparaison que l'on effectue on peut considérer différents niveaux dans l'analyse du timbre.

A un premier niveau, on doit pouvoir dégager les caractéristiques fondamentales communes aux sons produits par des tuyaux à embouchures de flûtes, par opposition à ceux des autres instruments à vent.

A un deuxième niveau on comparera les sons des diverses flûtes entre elles pour essayer de dégager les caractéristiques propres aux divers modes d'excitation du tuyau à bouche.

Enfin un instrument d'un type donné, possède un certain nombre de particularités de timbre qui permettent de le différencier des autres instruments de même type joués par le même musicien et qu'il s'agira de préciser.

L'étude du timbre est donc bien un problème de reconnaissance des formes spectrales et temporelles des instruments. L'analyse au sonographe va nous permettre de dégager quelques éléments fondamentaux.

§ 4.30 - 1er niveau : le timbre " flûte "

a) Répartition de l'énergie dans le spectre

Comparons tout d'abord différents types d'instruments à vent du point de vue du nombre et de l'intensité des harmoniques.

La figure 8 montre les sonagrammes de gammes chromatiques jouées legato à la trompette, à la clarinette, au cor, sur le hautbois, à la flûte traversière moderne et à l'accordéon.

On constate tout d'abord que les sons successifs d'un instrument donné sont tous différents, ce qui en fait l'intérêt sur le plan perceptif. Selon le type d'instrument le musicien peut modifier plus ou moins largement le spectre de chaque son. Néanmoins on peut énoncer les traits communs aux instruments à anche :

- il existe dans le spectre des instruments à anche des zones de fréquence plus ou moins bien définies dans lesquelles les harmoniques sont renforcées : on peut ainsi rencontrer des harmoniques de rang élevé (13,14,15 à la clarinette) ayant une grande intensité.

- le fondamental est souvent faible et peut même disparaître dans le registre grave (trompette et clarinette pour les premières notes non visibles ici).

- le nombre des harmoniques est grand (hautbois, accordéon). A l'opposé, on voit que pour la flûte le fondamental toujours très visible est très intense. L'essentiel de l'énergie étant concentré dans les premiers harmoniques on peut considérer que le nombre des harmoniques effectivement perçus à distance est faible.

b) Pente et forme des transitoires d'attaque :

fig.9

Pente - Nous avons rassemblé sur une même figure (fig.9) quelques notes détachées de trompette, de hautbois, de clarinette et de saxophone alto, pour les comparer à la flûte traversière et à la flûte à bec.

Pour estimer la durée du transitoire nous repérons l'apparition de la première composante du son (bruit ou harmonique) et le moment où la majorité des harmoniques s'est établi. Bien que la durée des transitoires dépende du registre de la note, de son intensité et de la technique du joueur, il apparaît clairement que la flûte traversière montre de loin les plus longues durées. Donnons des ordres de grandeur en classant les instruments. On a : hautbois 5 à 10 ms; flûte à bec 10 ms, clarinette 10 à 20 ms, trompette 20 à 25 ms, saxophone alto 20 à 25 ms, flûte traversière 30 à 40 ms.

Les 2 types de flûtes se situent donc aux 2 extrêmes; on peut prévoir que l'on reconnaîtra facilement l'une de l'autre en jeu détaché.

Forme des transitoires - Comparons des notes dont le transitoire a une durée semblable : flûte à bec et hautbois. On voit que pour ce dernier la montée en intensité du fondamental se fait très rapidement alors que pour la flûte à bec il présente l'aspect d'un fuseau allongé : la perception sera donc fort différente dans l'un et l'autre cas. On voit également la présence de bruits de souffle au début de l'attaque des flûtes et l'apparition de partiels accrochés par le son de bouche. Nous avons fait une étude détaillée de ces phénomènes aux § 2.11 à 2.14.

fig.10

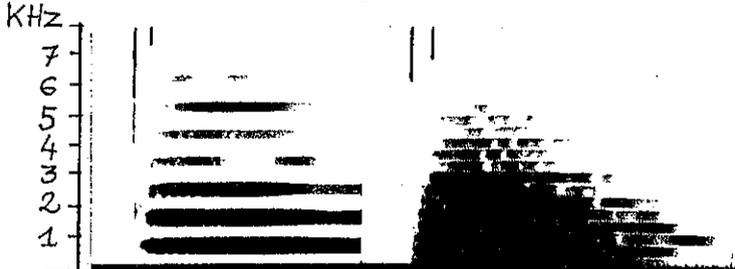
Pour confirmer l'importance du transitoire d'attaque dans la reconnaissance du timbre d'un instrument nous avons fait l'expérience suivante. Ayant joué deux sons de même hauteur, l'un au violon, l'autre à la flûte traversière, nous avons découpé sur la bande magnétique les 75 premières millisecondes du son de violon pour les remplacer par celles de la flûte*. On peut voir fig.10 l'analyse du son "composite" ainsi obtenu.

Aucun des musiciens à qui nous avons fait entendre ce son n'a été capable d'identifier les instruments d'origine : ce n'est plus du violon à cause de l'attaque, et ce n'est pas de la flûte en raison de la composition spectrale. La réponse la plus fréquente que nous avons obtenue est "instrument à vent (attaque) à anche (spectre)". Quelques auditeurs précisent : anche libre (harmonium, accordéon) dont l'attaque est souvent molle.

* 75 ms de son représentent 28,5 mm de bande magnétique à 38 cm/s

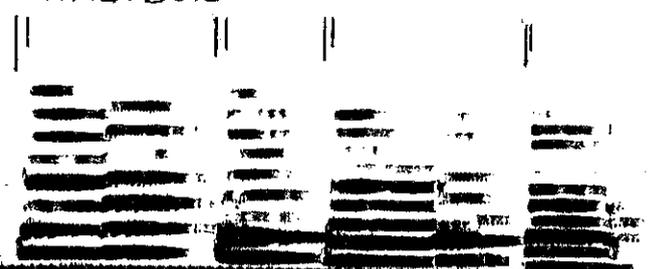
...../

TROMPETTE



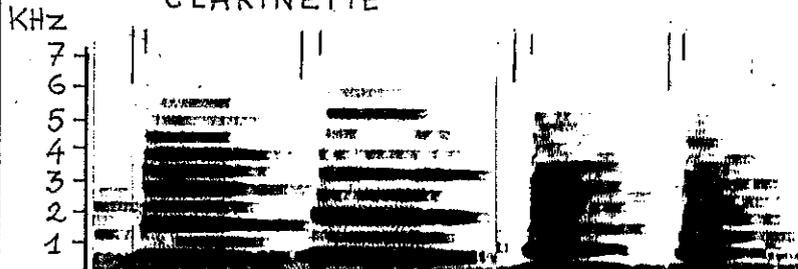
LA₄ SOL₃

HAUTBOIS



FA#₄ SOL₄ MI₄ RÉ₄ MI₄ SI₃

CLARINETTE



DO#₄ MI₄ MI₃ DO#₃

SAXOPHONE ALTO



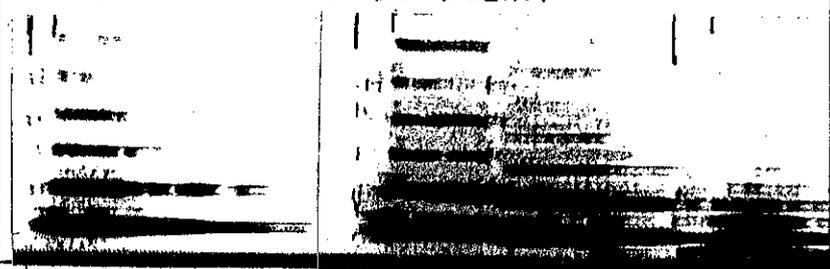
RÉ₄ SOL₄ SOL₃

FLÛTE TRAVERSIÈRE A 1 CLÉ



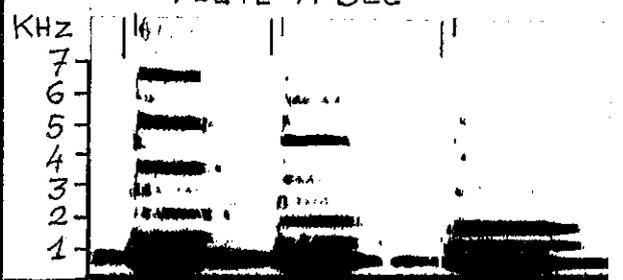
MI₄ RÉ₄ RÉ₅

FLÛTE TRAVERSIÈRE BOEHM

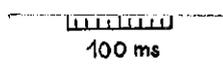


RÉ₅ RÉ₅ DO₅ DO₄

FLÛTE A BEC

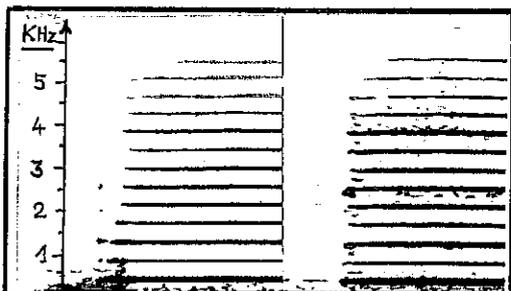


FA#₄ MI₄ RÉ₄

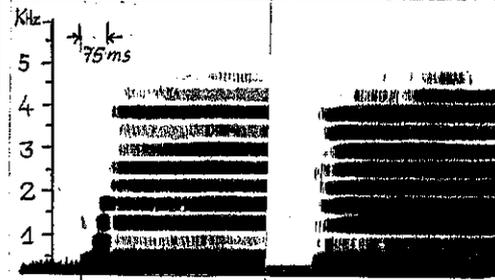


9

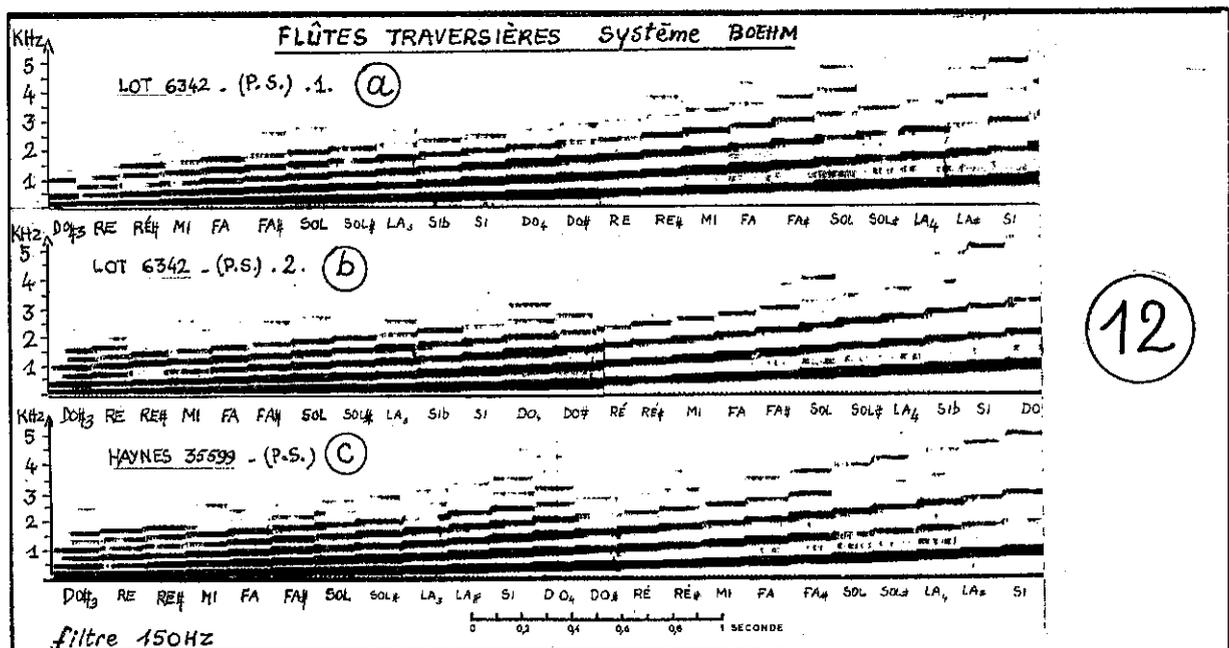
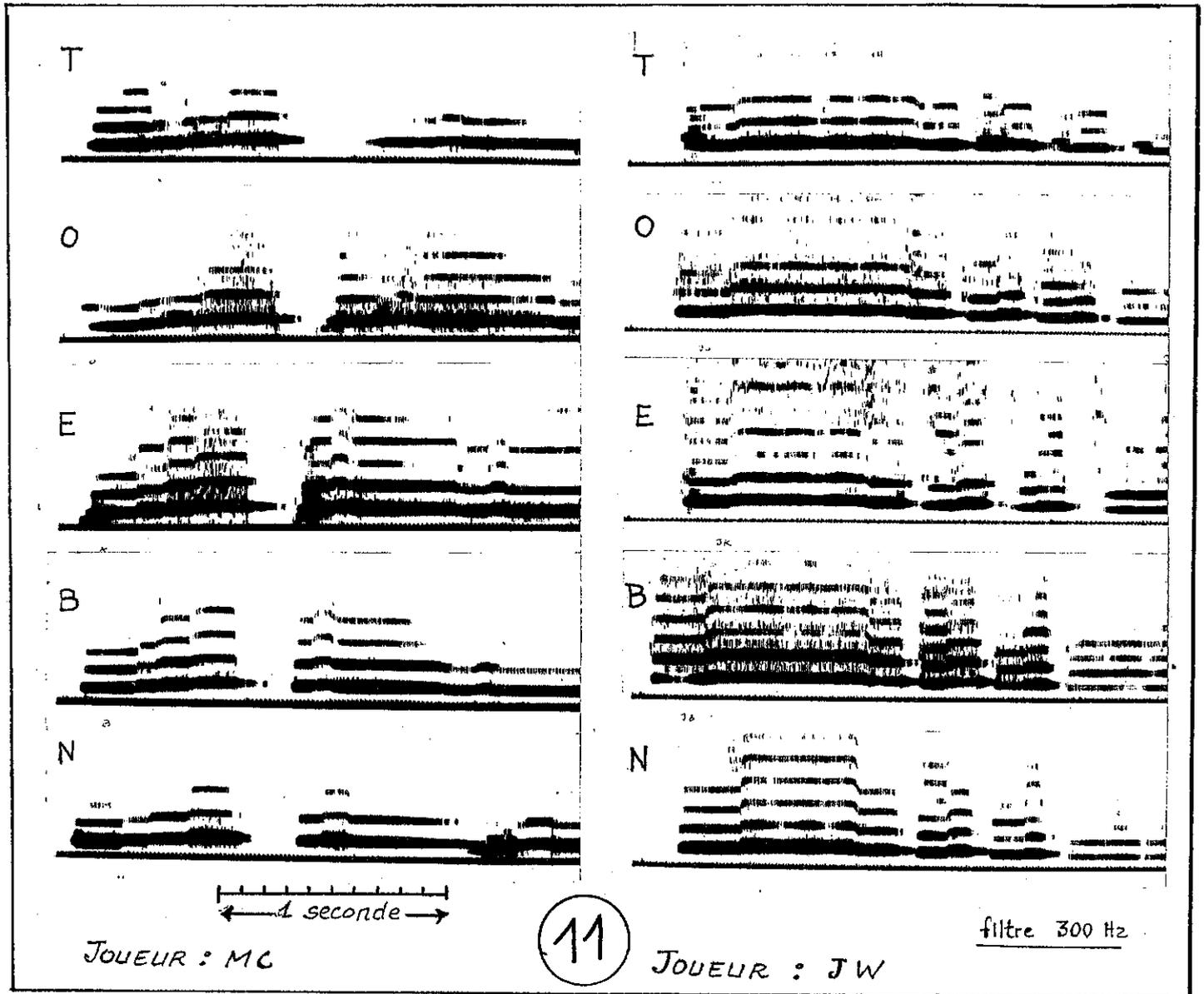
10



Son composite son de violon



filtre 300 Hz



§ 4.31 -- 2ème niveau : timbre des différents types de flûtes

Il existe différentes manières de jouer de la flûte, avec la bouche ou avec le nez, en adaptant ou non un bec, en soufflant sur le bord d'un trou latéral, sur une encoche ou sur le bord aminci du tuyau (flûte oblique).

Si ces modalités correspondent réellement à un résultat sonore particulier nous devons être en mesure de les identifier à l'audition. Mais lorsque nous écoutons des enregistrements provenant de divers pays, nous ne pouvons dissocier le type d'instrument du style de musique : nous reconnaissons la kena en entendant la musique des Andes, et le ney aux traits particuliers de la musique Iranienne.

Pour faire une expérience valable il fallait donc enregistrer dans les mêmes conditions une phrase musicale jouée par le même musicien, des 5 façons différentes.

Afin d'éviter la disparité des timbres et des hauteurs que nous aurions rencontré inévitablement en utilisant des instruments réels, nous avons procédé de la façon suivante. Ayant coupé un tuyau ($L = 16 \text{ mm}$ $D = 600 \text{ mm}$) et percé 6 trous de façon à jouer une mélodie quasi diatonique nous avons fabriqué 4 embouchures raccordables au tuyau : bec (B), encoche (E), traversière (T); nasale (N), en conservant le bord aminci du tuyau pour la flûte oblique (O).

Un musicien ayant accepté de s'entraîner à ces 5 techniques de flûte nous lui avons demandé de jouer selon chacune d'elles une même phrase musicale comportant des sons liés et des sons détachés.

Puis nous avons nous même effectué l'expérience. Nous disposions alors de 2 enregistrements faits avec le même tuyau (perce et trous) excité de 5 façons différentes. Il fallait ensuite le faire entendre à des musiciens. Le test est évidemment très difficile, car rares sont les musiciens qui ont entendu tous les types de flûtes. Si la plupart des musiciens connaissent bien la flûte à bec et la flûte traversière peu ont entendu la flûte oblique et encore moins la flûte nasale. Nous avons donc procédé de la façon suivante.

A tous nous demandons en premier lieu de regrouper les 5 modes de jeu en deux classes distinctes. On obtient ainsi sans difficulté :

- a - flûte à bec et flûte nasale
- b - flûte à encoche, traversière et oblique.

Ayant nommé les 5 modes d'embouchure nous demandons ensuite aux auditeurs de les attribuer aux échantillons qu'ils entendent. La flûte à bec est généralement reconnue sans problème, puis la flûte oblique et la flûte traversière. Toutefois celle-ci est souvent confondue avec la flûte à encoche. La flûte nasale est "identifiée" par élimination et en raison de son étrangeté.

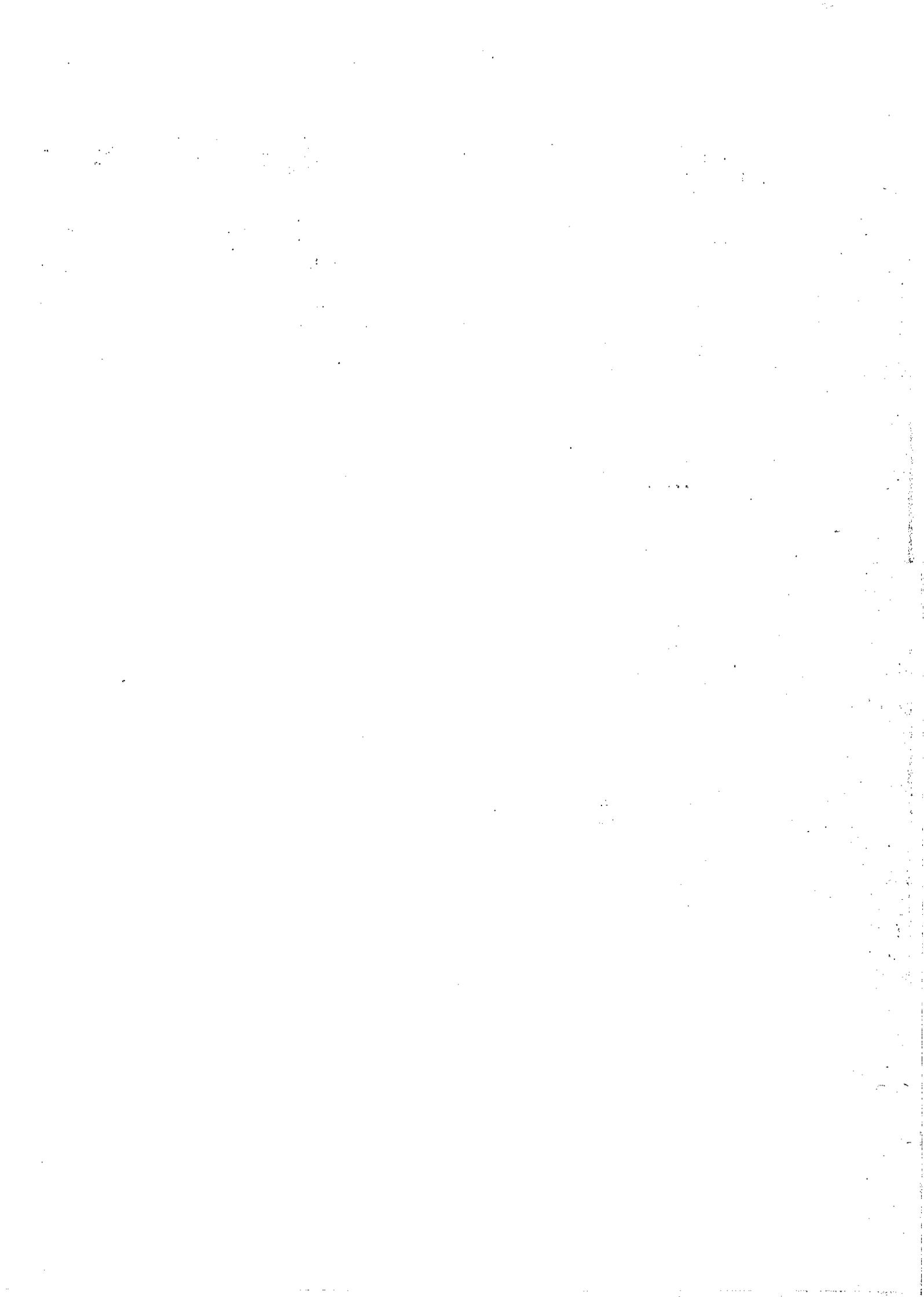
L'expérience a montré que les auditeurs sont, ou totalement incapables de répondre à la deuxième question, ou répondent juste. Les tests ayant été faits avec les deux enregistrements (J.W. et M.C.) il semble donc bien que ces 5 modes d'excitation soient identifiables en tant que tels, mais nous ne sommes pas encore en mesure d'en analyser les raisons de façon précise.

fig.11

Nous montrons fig.11 l'analyse d'un court passage joué par les deux flûtistes selon les 5 techniques.

Malgré les différences provenant du joueur et dans une certaine mesure également de la prise de son (plus rapprochée pour J.W.) on reconnaît bien :

1) qu'il s'agit de flûte par l'intensité du fondamental et le plus souvent de l'harmonique 2, par la forme des attaques et la présence de souffle.



2) B et N montrent, pour les 2 joueurs, des attaques nettes, franches, sans bruit, qui s'opposent bien à celles de T, O et E.

3) les attaques de plus longue durée sont celles de T.

4) les analyses de E montrent un harmonique 2 intense et stable. Cependant il serait hasardeux de vouloir systématiser.

Pour difficile que soit cette expérience il nous paraît intéressant de la reprendre en étant plus attentif aux conditions de prise de son, (les divers modes d'excitation ayant des directivités différentes) et en effectuant le test à une plus large échelle.

§ 4.32 - Timbre d'un instrument à excitation réglable (flûte traversière)

La question nous a souvent été posée de comparer le timbre de deux flûtes traversières de même modèle. Le problème est d'une grande complexité. Avec un instrument donné, le musicien peut produire une grande variété de timbres; même s'il possède une grande maîtrise et qu'il s'efforce de jouer de façon "standard, normale", un exemple "neutre" comme une gamme chromatique, le flûtiste est incapable de reproduire strictement la même chose deux fois de suite avec le même instrument.

fig.12

On pourra comparer (fig.12a et b) les notes DO \sharp 3, RE3, SOL \sharp 3, SIb3 des deux gammes jouées par le même flûtiste sur la même flûte, à quelques secondes d'intervalle.

Pourtant, au travers des variables, le musicien émet généralement une opinion bien définie sur un instrument et il serait intéressant de pouvoir la raccorder avec l'analyse spectrale. En comparant d'une part a) et b) entre eux et en les opposant à c) on remarque tout de même que pour le 1er instrument les sons Ré \sharp , FA, SOL, LA, de la première octave sont plus nets, plus riches que les sons chromatiques intermédiaires (voir l'harmonique 5), ce qui montrerait une moins bonne homogénéité de l'instrument qu'en c).

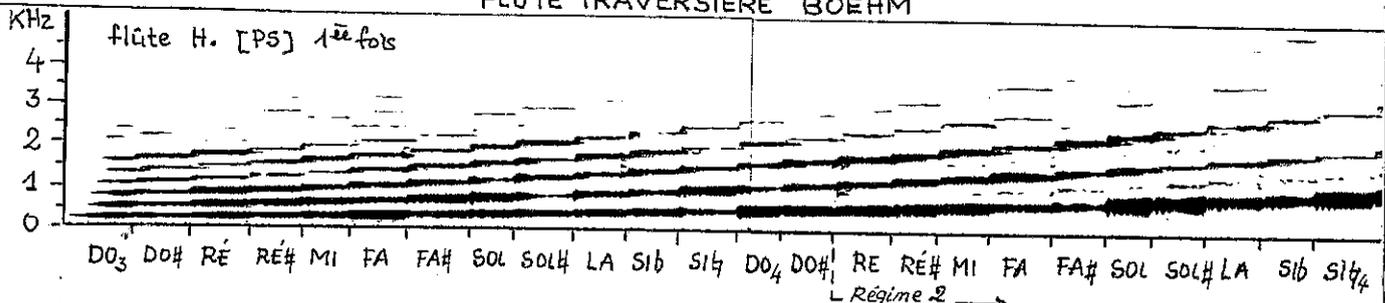
De telles conclusions sont tout de même bien fragiles. L'étude du timbre d'un instrument à excitation réglable exigerait un grand nombre d'analyses du même exemple joué plusieurs fois de suite, comportant du jeu lié, détaché, à des intensités différentes, complété par des analyses du même instrument joué par des musiciens différents. On atteint, avec ce genre de problème les limites des possibilités d'analyse du sonographe. L'appréciation du musicien est statistique, se fait sur une durée suffisante (3 à 4 mn) et met en jeu un grand nombre d'opérations mentales complexes qui aboutissent à l'emploi d'un ou deux adjectifs qualifiant le timbre. Ceux-ci correspondent à quelque chose de bien précis dans l'esprit du musicien mais restent malheureusement d'un usage individuel.

Les travaux actuels de M. LEIPP dans le domaine de la densité spectrale laissent un espoir de traiter de façon objective l'étude du timbre des instruments de musique.

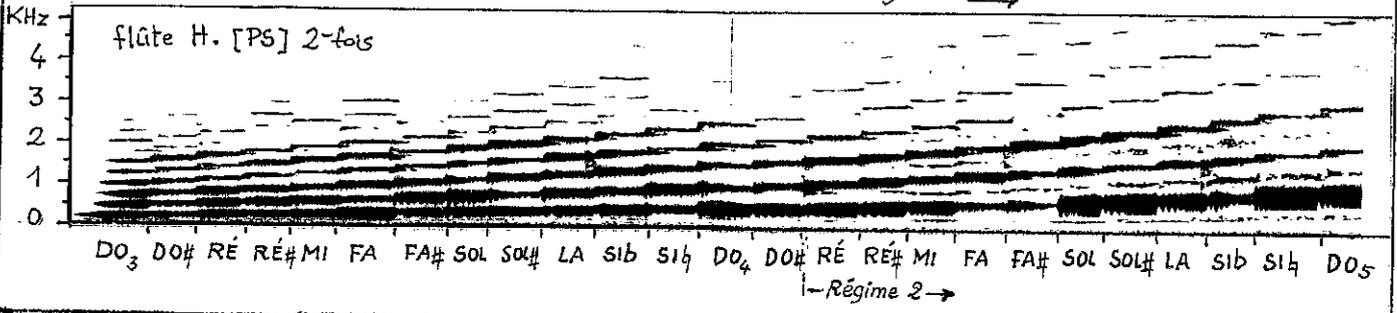
§ 4.33 - Comparaison de trois flûtes classiques occidentales : la flûte traversière à une clé, la flûte moderne (BOEHM) et la flûte à bec baroque.

Malgré les difficultés inhérentes à l'étude du timbre des instruments à excitation réglable on peut, à l'aide du sonographe, faire d'intéressantes comparaisons entre des instruments de type différent. Prenons le cas d'instruments qui peuvent servir une

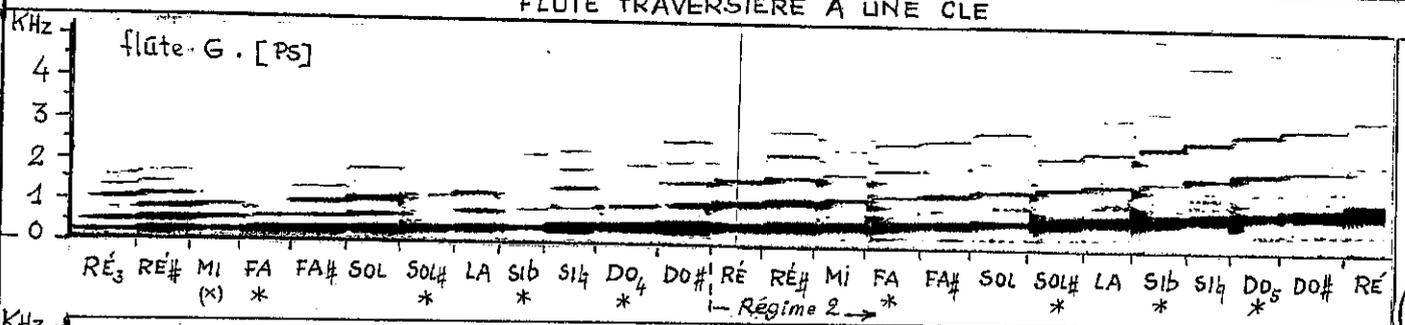
FLUTE TRAVERSIERE BOEHM



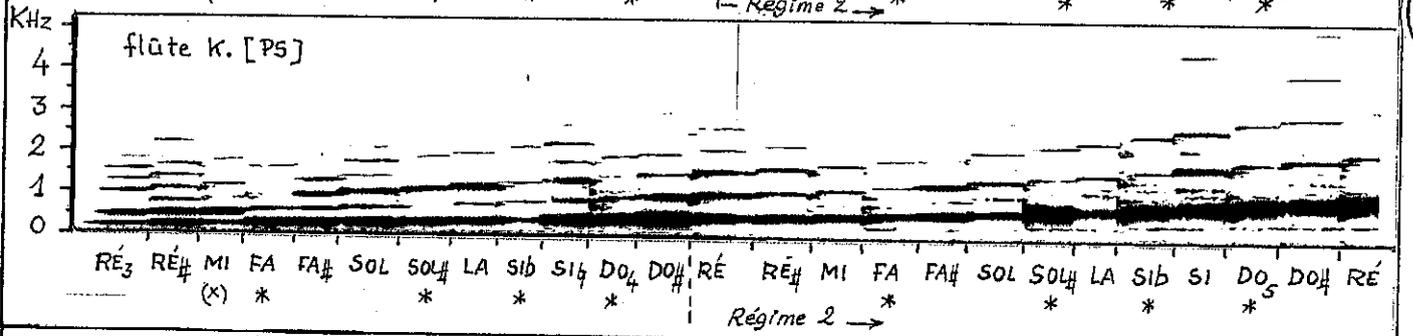
13a



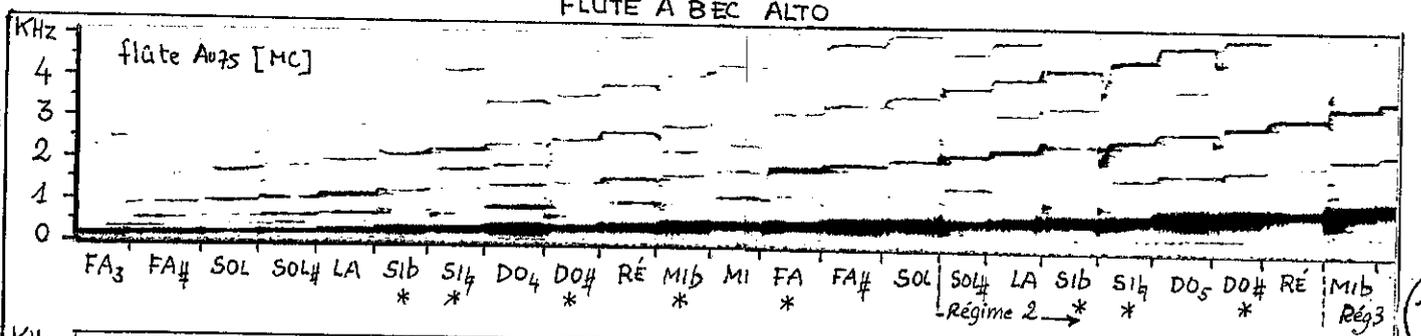
FLUTE TRAVERSIERE A UNE CLÉ



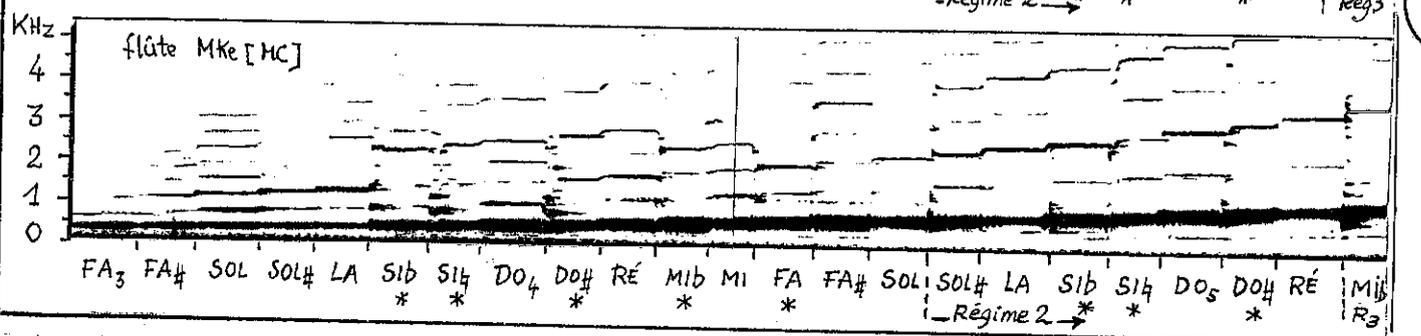
13b



FLUTE A BEC ALTO



13c



même musique. Au 18ème siècle, la flûte à bec et la flûte traversière à une clé avaient en commun une partie du répertoire : les mêmes musiciens jouant des 2 instruments pouvaient utiliser indifféremment l'un ou l'autre moyennant une transposition pour tenir compte de la tessiture. La flûte traversière moderne qui est devenue l'unique flûte de l'orchestre est utilisée aujourd'hui pour jouer toute littérature de flûte (y compris celle du 18ème siècle).

Nous avons pris soin d'enregistrer les instruments, strictement dans les mêmes conditions. Le niveau d'entrée du magnétophone a été réglé pour l'instrument le plus intense, la flûte moderne, puis n'a plus été modifié. Le micro était placé à 60 cm du flûtiste, face à l'embouchure. C'est le même musicien qui joue les flûtes traversières.

Bien que peu musicale et inhabituelle sur la flûte traversière à une clé, la gamme chromatique offre l'avantage de fournir tous les sons de l'instrument et de permettre des comparaisons faciles entre instruments. Jouée en legato elle met clairement en évidence l'homogénéité de timbre recherchée à la flûte traversière moderne par opposition aux instruments " baroques ", dont l'allure spectrale est plus irrégulière.

a) - Gammes chromatiques en legato :

fig.13a

- Flûte traversière système BOEHM. Les deux gammes ont été jouées sur le même instrument. On voit sur le sonagramme que le musicien développe de façon régulière 5 à 6 harmoniques intenses dans la 1ère octave, 3 à 4 dans la 2ème octave. L'énergie est concentrée de façon variable sur les 3 premiers d'entre eux. Les notes s'enchaînent nettement. Quelques traces entre les harmoniques 1 et 2 signalent que Ré4 et Ré#4 appartiennent au régime 2 mais ceci est encore plus net lorsque disparaît le trou d'octavation à partir du Mi4; jusqu'au Do5 le régime 1 est présent sous forme " chuchotée ".

fig.13b

- Flûte traversière à une clé. Au travers des variables provenant des deux instruments différents et de celles introduites par le joueur il apparaît clairement des points communs entre les analyses qui vont nous permettre de caractériser la flûte traversière à une clé. Nous avons signalé les sons de fourche par un astérisque.

Les deux notes graves Ré3 et Ré#3 sont riches et sonores. Nous savons que cela est dû à la perce particulière de la patte conique divergente (cf. § 3.72) Mi est un quasi son de fourche puisqu'on referme la clé de Ré ; c'est aussi le 1er trou ouvert (cf. § 3.23). Des sons de fourche de la 1ère octave Sol#3 est le plus remarquable sur le sonagramme et à l'oreille, car il est dépourvu d'harmonique 2, puis vient Sib, également pauvre. Chaque note a son timbre ce qui confère à l'écoute d'une simple gamme chromatique énormément d'intérêt.

Comme sur la flûte moderne les " bonnes " notes possèdent 5 à 6 harmoniques dans la 1ère octave et 3 à 4 dans la seconde, mais ici l'intensité est concentrée de façon importante sur le fondamental.

Les bruits de transition dus aux partiels inharmoniques des sons de fourche sont beaucoup plus accusés dans la 2ème octave (voir Fa, Sol#, Sib, Do). Ils sont une caractéristique très particulière à l'instrument que le joueur ne peut jamais éliminer tout à fait.

Enfin les sons du régime 2 comportent également des bruits d'écoulement sur les fréquences du régime 1 mais plus complexes que pour la flûte moderne.

fig.13c

- Flûte à bec alto (instruments de facture moderne). En raison de l'emploi de sons de fourches la flûte à bec offre à première vue bien des analogies avec la flûte traversière à une clé : contraste entre sons riches et sons sourds,

partiels de transition. On note cependant deux différences fondamentales :

- Les notes graves de l'instrument sont faibles; pratiquement seul le fondamental est visible sur le sonagramme.
- L'harmonique de loin le plus intense pour toutes les notes est le fondamental. La faiblesse de l'harmonique 2 et l'importance relative du 3 et même du 5 confèrent aux deux instruments ici analysés un timbre " creux " assez particulier. Nous avons vu à ce sujet l'importance du réglage du bec (cf. § 2.55).

b) - Gammes chromatiques détachées :

fig.14
planche 87

Le détaché permet de faire l'analyse des transitoires d'attaque et confirme ce que nous avons vu précédemment (§ 4.30). La figure 14 montre une opposition frappante entre les flûtes traversières dont les notes ont l'allure caractéristique de fuseaux, et les flûtes à bec, d'attaque franche, dont les sons s'établissent très rapidement.

L'homogénéité de la flûte moderne apparaît de façon encore plus manifeste, de même que la faiblesse relative de la flûte à bec dans la 1ère octave. Les partiels d'attaques des régimes 2 et 3 et ceux des sons de fourche sont plus accusés dans le jeu détaché.

c) - Mélogie jouée sur les 3 instruments :

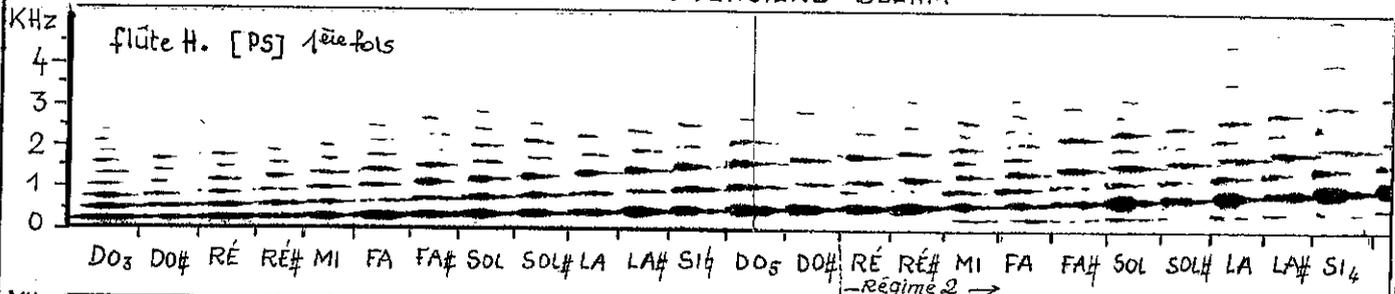
fig.15
planche 83

Pour poursuivre cette comparaison nous avons demandé aux musiciens de jouer une courte mélodie comportant intentionnellement des notes altérées qui mettent bien en évidence les particularités des deux flûtes baroques. Les inégalités de timbre, utilisées à des fins expressives, offrent beaucoup d'intérêt à l'écoute. Ainsi Sib et Sol \sharp , notes de broderies autour du La, sont par nature d'une sonorité différente, en accord avec leur fonction musicale. Chaque tonalité a un caractère sonore qui lui est propre et dont un compositeur habile pourra tenir compte. Cette particularité, musicalement intéressante est totalement perdue dès que l'on joue sur la flûte moderne où les sons ont la plus grande homogénéité possible.

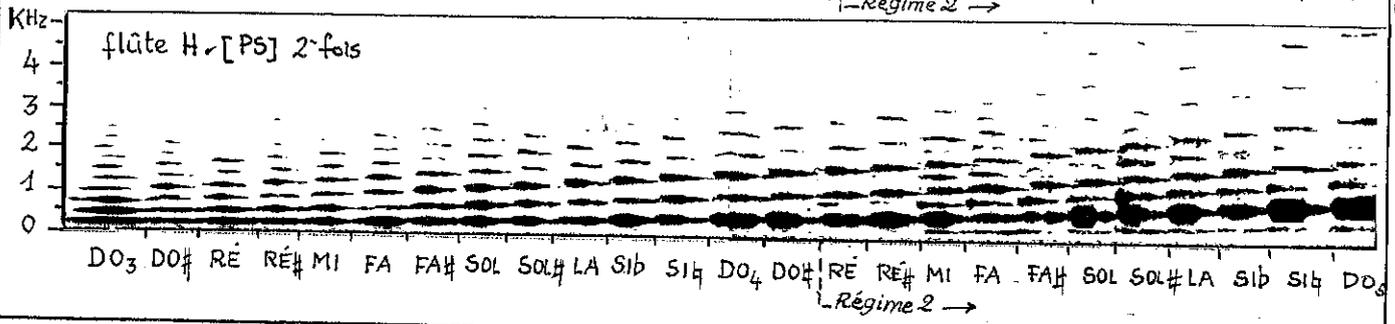
L'étude comparée du timbre des flûtes traversières permet de mieux comprendre les réactions des musiciens de l'époque lors de l'apparition de la flûte BOEHM. D'une part les musiciens attachés à la flûte à une clé reprochent à la nouvelle flûte un " son maigre, sans rondeur, se rapprochant de celui du hautbois". Ces jugements subjectifs sont justifiés en raison de l'augmentation du nombre des harmoniques et de l'affaiblissement relatif de l'intensité du fondamental.

D'autre part BOEHM s'étonnait en ces termes du mauvais accueil fait aux débuts de sa nouvelle flûte : " La puissance et l'égalité de son furent précisément les défauts qu'on lui reprochait " (Cf. BOEHM (1) p. 10). Or nous savons que la justesse, l'intensité et le timbre sont liés; on ne peut améliorer les 2 premières qualités sans modifier la 3ème. Ayant totalement modifié la perce intérieure, la place et la dimension des trous, BOEHM avait créé une nouvelle flûte n'ayant que peu de rapports avec celle qui existait ! Ce nouvel instrument qui possède d'autres particularités de sonorité, de justesse, et une étendue plus grande a provoqué l'éclosion d'une abondante littérature romantique et moderne pour la flûte; mais on voit qu'il convient mal à la musique écrite pour la flûte à une clé.

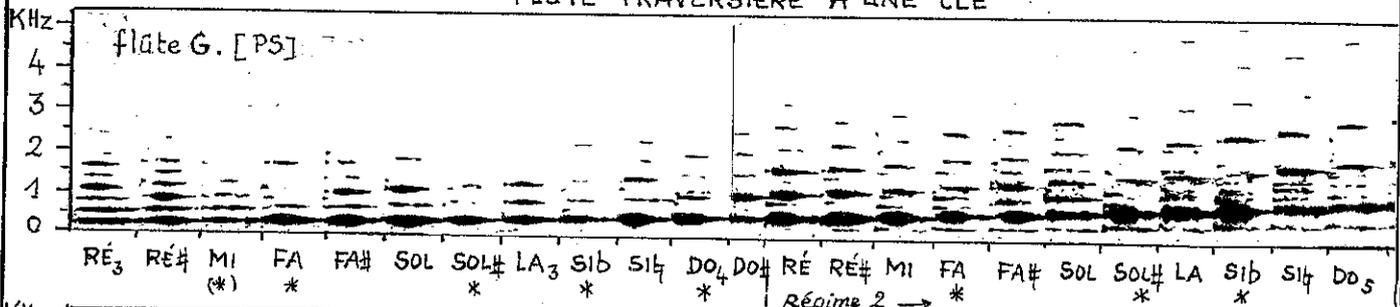
FLUTE TRAVERSIERE BOEHM



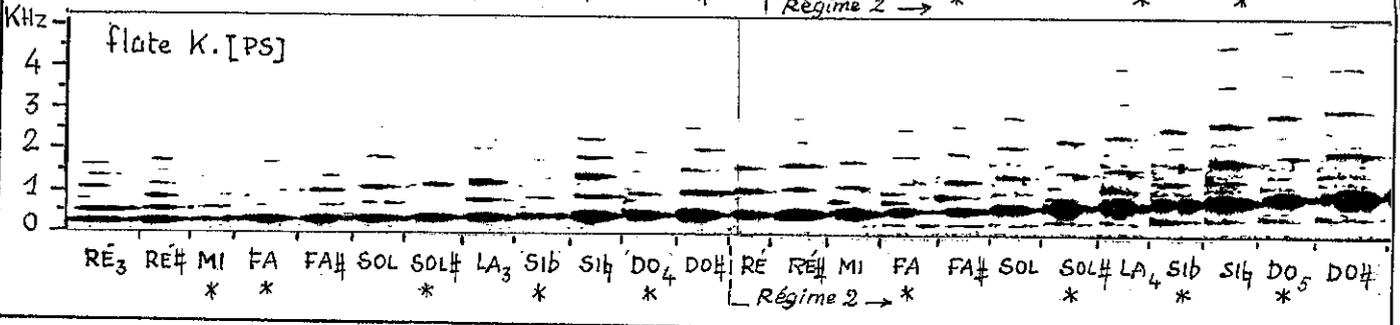
14a



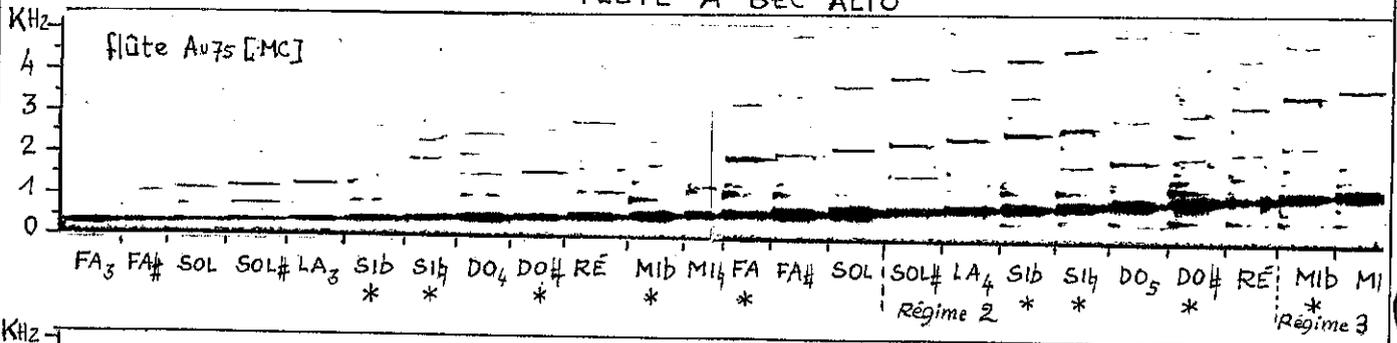
FLUTE TRAVERSIERE A UNE CLÉ



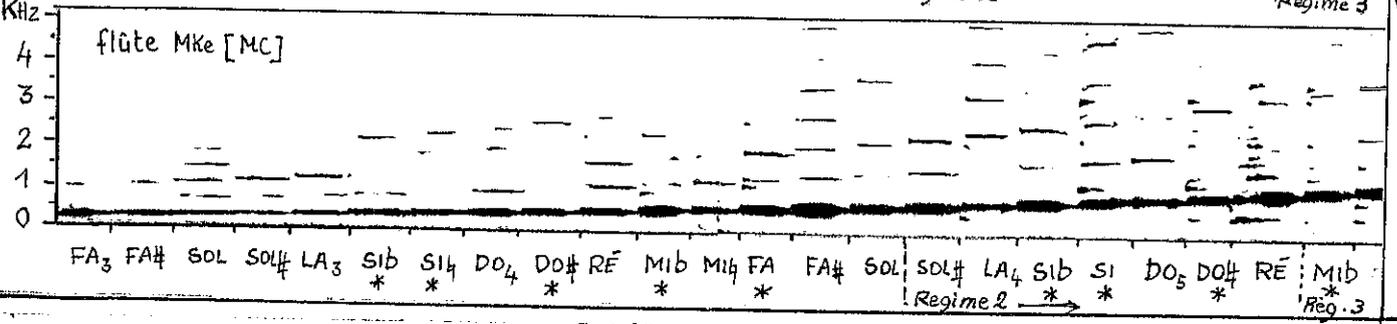
14b



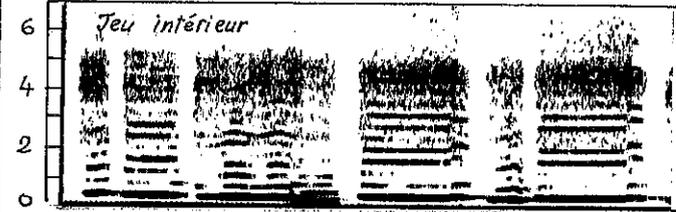
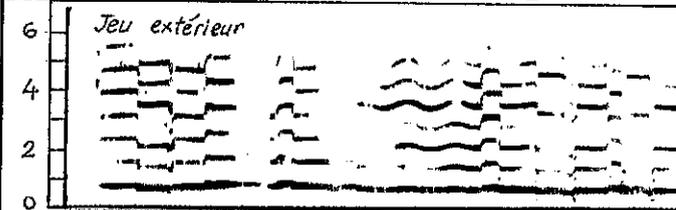
FLUTE A BEC ALTO



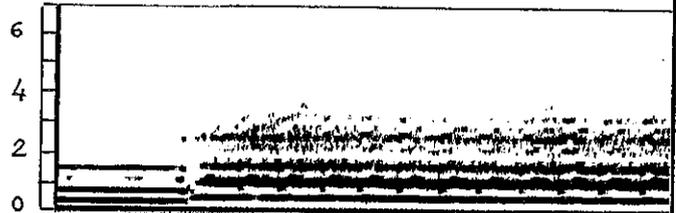
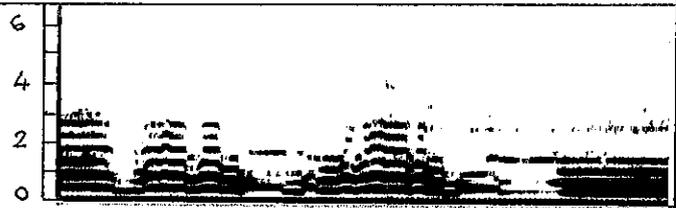
14c



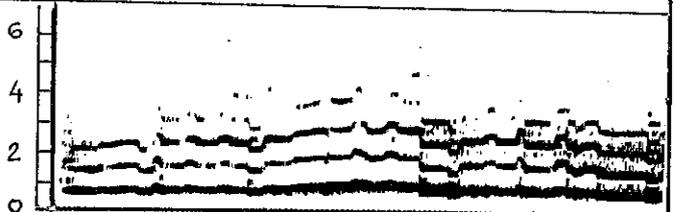
KHz flûtes obliques (16) a



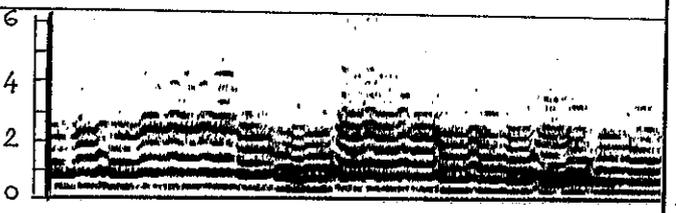
NEY IRANIEN



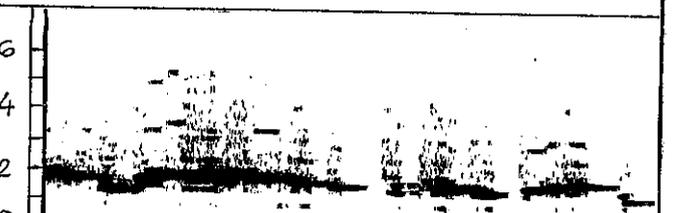
GASBA - Tunisie



KAVAl - Bulgarie 1

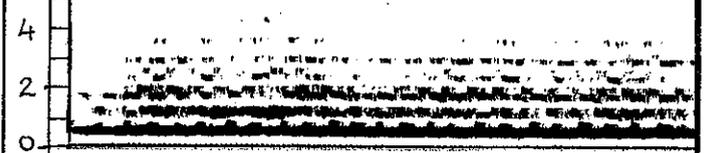
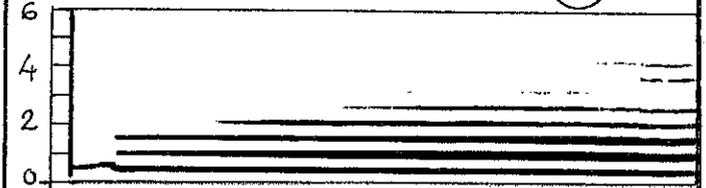


KAVAl - Bulgarie 2

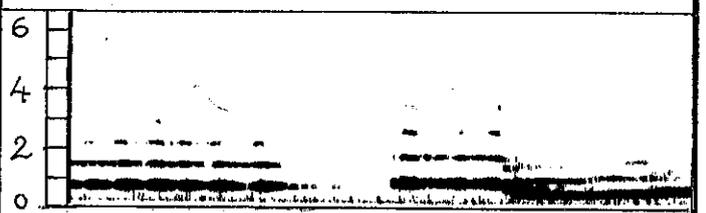


TILINCA - Roumanie

KHz flûtes à encoche (16) b

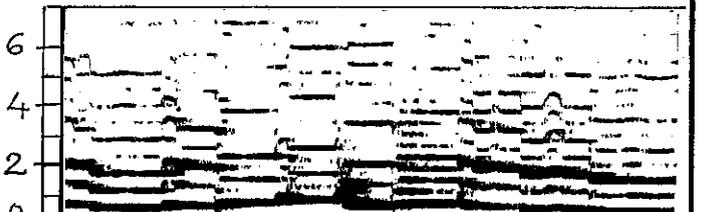
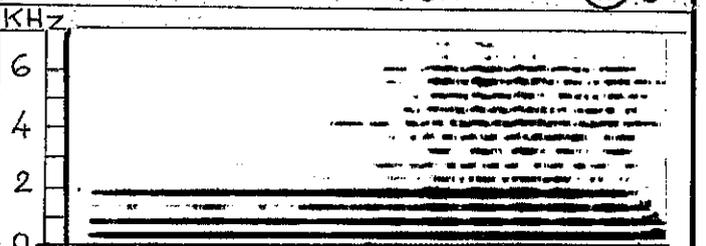


SHAKUHACHI - Japon

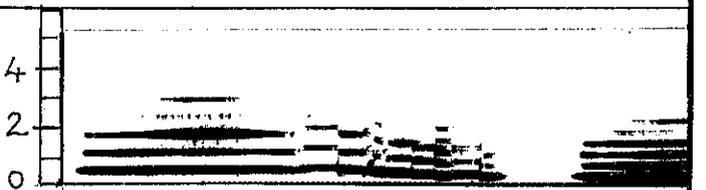


KENA - Pérou

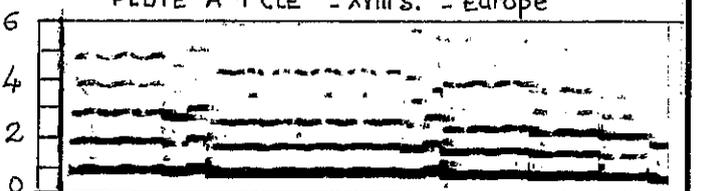
flûtes Traversières (16) c



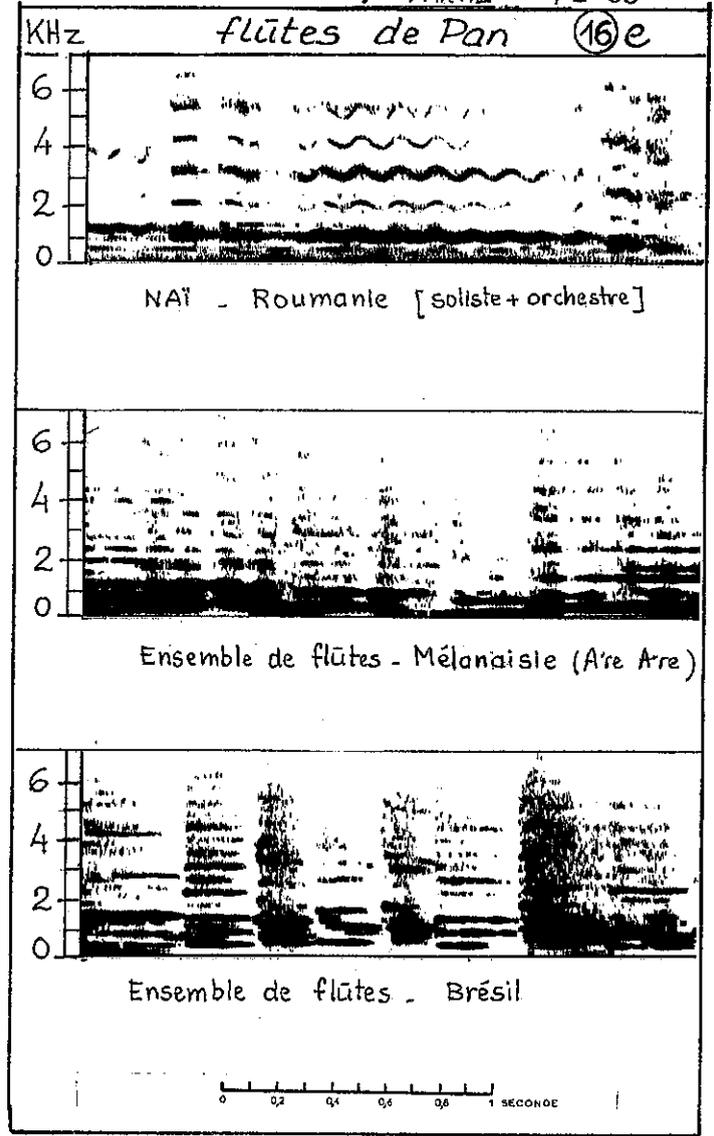
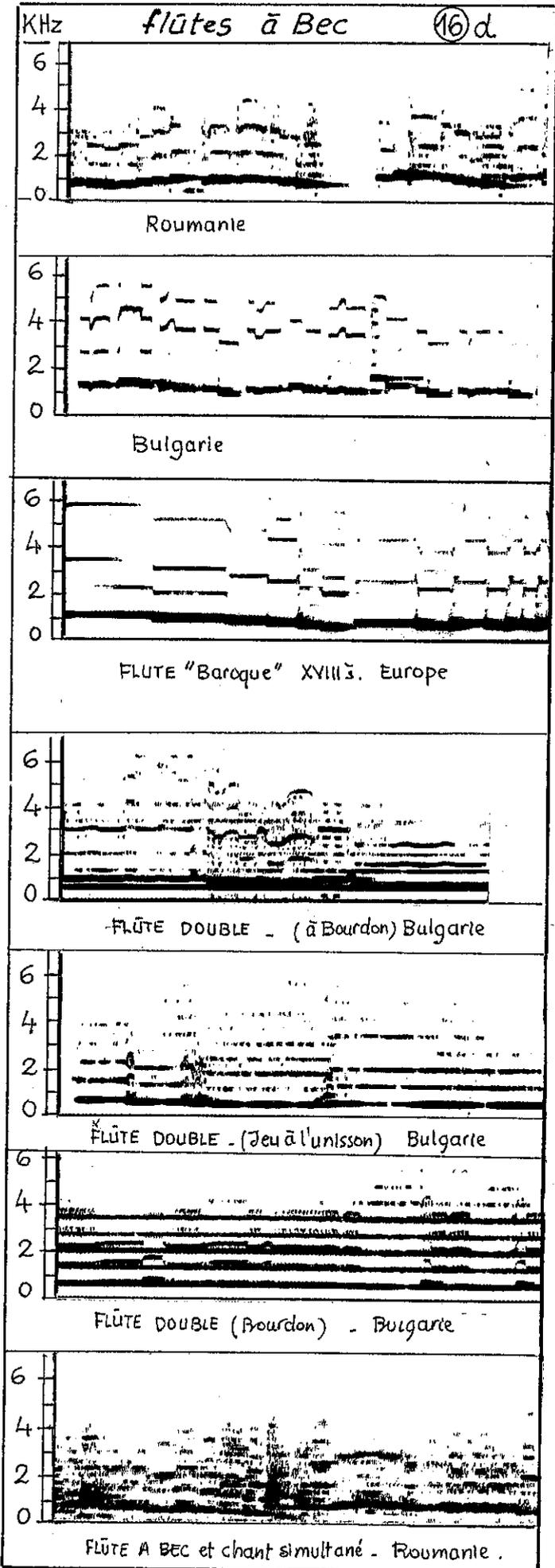
FLûTE A MIRLITON - Chine



FLûTE A 1 CLÉ - XVIII's. - Europe



FLûTE BOEHM





§ 4.34 - " Panorama " spectrographique des flûtes

fig.16
planches
88 et 89

Ayant analysé un grand nombre d'exemples de musique de flûte de divers pays nous avons pensé intéressant de regrouper les analyses par famille. Tous les instruments sont solistes, excepté les 2 ensembles de flûte de Pan.

Le seul point commun à toutes ces images est bien la permanence et l'importance du fondamental. La richesse des harmoniques dépend évidemment des conditions d'enregistrement, fort diverses ici : la flûte munie d'un mirilton tranche pourtant nettement.

Notons l'extrême diversité d'aspect des instruments dont les paramètres de l'excitation sont réglables : le musicien peut se permettre des sons de longue durée car il peut varier le timbre. Notons également que la limitation dans la variation du timbre inhérente à la flûte à bec est souvent compensée par un jeu plus virtuose.

Les flûtes doubles offrent évidemment une image particulière. Dans l'exemple où les deux tuyaux sont joués à l'unisson on remarquera les battements qui proviennent d'un léger désaccord, sans doute volontaire.

L'image de la Tulinca est particulièrement originale : c'est le seul exemple d'instrument utilisant exclusivement des partiels.

Les 2 premiers exemples relatifs au ney iranien confirment, s'il en était besoin, l'extrême diversité des sonorités possibles en jouant sur l'excitation; il s'agit du même tuyau joué soit à l'extérieur de la bouche, soit à l'intérieur. (cf § 2.32)

On notera enfin la recherche du bruit de souffle dans les ensembles de flûtes de pan, et son utilisation à des fins rythmiques.

* *

*

CHAPITRE V

QUELQUES PROBLEMES PARTICULIERS A L'ORGUE ET A LA FLUTE TRAVERSIERE

A - LE BOUCHON DE LA FLUTE TRAVERSIERE

§ 4.35 - Généralités

Le tuyau de la flûte traversière ne s'arrête pas au niveau de la lumière : il se continue de l'autre côté en formant une cavité située au delà du trou d'embouchure, dont le rôle sur la justesse et la sonorité est complexe.

On sait que pour exciter convenablement un tuyau ouvert au moyen d'un système lame d'air-biseau il faut que le tuyau soit partiellement fermé à l'embouchure.

Lorsque le tuyau est excité à une extrémité on le ferme soit par un bouchon (flûte à bec) soit par les lèvres en jouant (flûte à encoche, flûte oblique, cf. fig.34 PL.16). Dans ces trois cas le tuyau proprement dit commence au niveau de l'embouchure (fig.17 (1)).

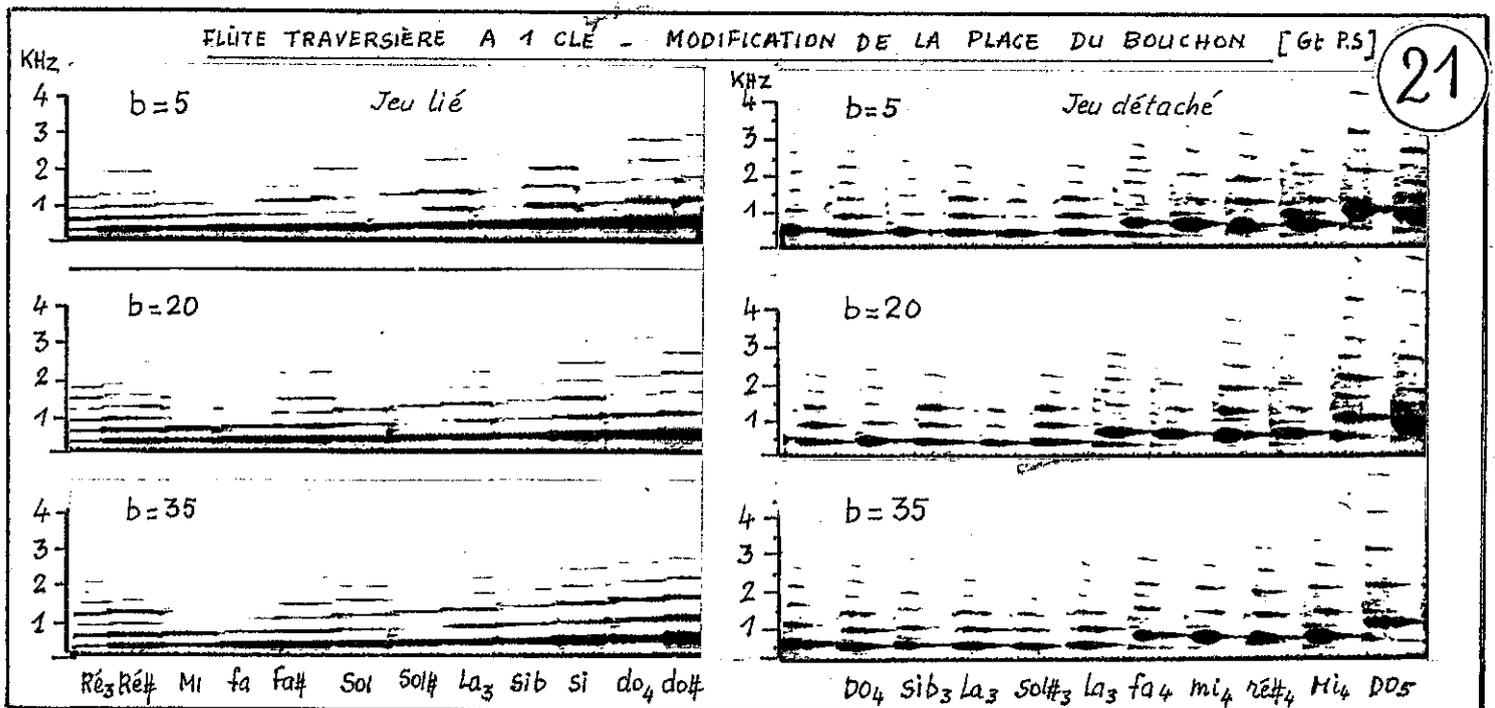
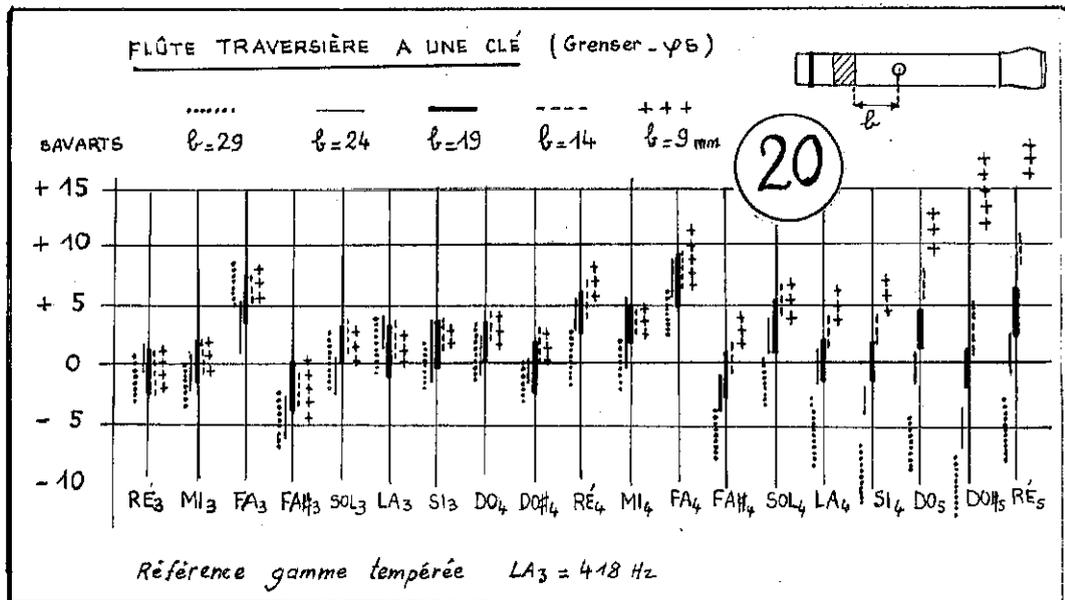
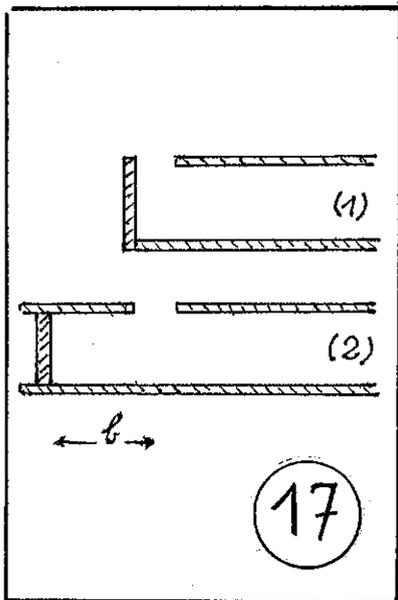
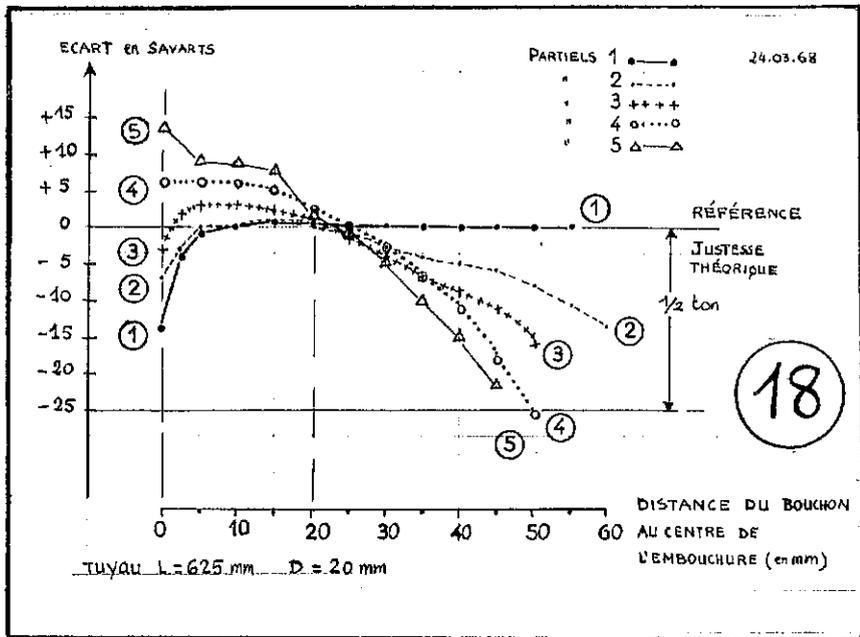
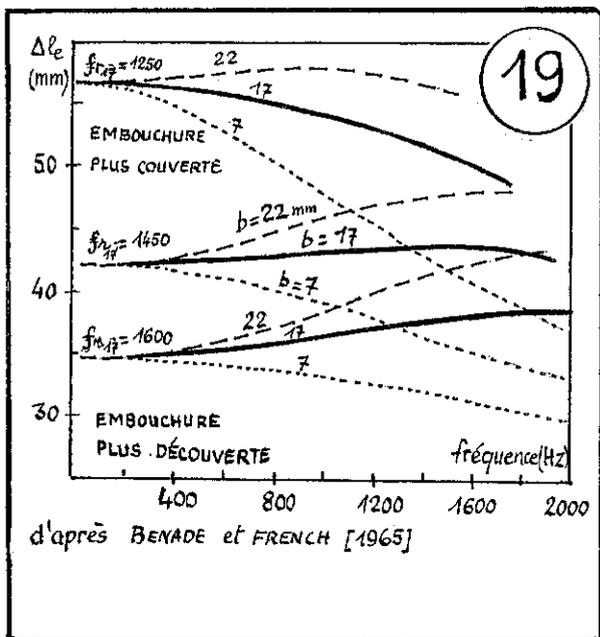
Dans le cas d'une excitation transversale le trou qui sert d'embouchure étant de petites dimensions par rapport au diamètre du tuyau, on peut exciter facilement un tuyau ouvert aux deux bouts en n'importe quel endroit; mais en fait on excite simultanément deux tuyaux couplés au niveau de la bouche puisque la vibration se propage simultanément de part et d'autre de l'embouchure. De telles flûtes existent, mais le plus souvent on annule un des deux tuyaux à l'aide d'un bouchon. Sauf de très rares instruments (flûte Nô) le bouchon n'est pas placé au niveau du trou mais à une distance (b) de celui-ci, qui est couramment de l'ordre des dimensions du diamètre D du tuyau (fig. 17 (2)). La bonne place du bouchon dépend à la fois de la construction de l'instrument, de son emploi et des paramètres de l'embouchure, c'est pourquoi nous avons placé ce chapitre dans la dernière partie.

§ 4.36 - Place du bouchon. Tuyau cylindrique (sans trous); Excitation fixe.1) Expérience :

Prenons un tuyau cylindrique $L = 625$ mm, $D = 20$, muni d'une embouchure de flûte traversière circulaire $d = 12$, que nous excitions à l'aide d'un ajutage convenablement orienté qui restera fixe pour toute la durée de l'expérience. La position du bouchon étant réglable nous relevons pour chaque valeur de (b) les limites supérieure et inférieure du champ de liberté en fréquence des partiels successifs obtenus par pression croissante (fig.18).

$b = 0$; Le bouchon obture partiellement le trou d'embouchure; le fondamental du tuyau est $DO\# 3-14$ savarts. Les partiels sont tous plus hauts que les harmoniques du fondamental.

$b = 5$; Le trou d'embouchure étant découvert la fréquence du fondamental monte et l'inharmonicité des partiels diminue. Mais ils sont toujours plus aigus que les harmoniques du partiel 1.



$b < 22$; Le bouchon s'éloignant de l'embouchure, on constate que P1 ne bouge pas mais que P2, P3, P4 et P5 baissent progressivement. Pour $b = 22$ les partiels sont pratiquement justes.

$b > 22$; Les partiels continuent à descendre à mesure que b croît.

On peut en conclure que la cavité laissée par le bouchon abaisse d'autant plus les partiels que la fréquence de ceux-ci est plus élevée; l'effet croît avec b .

- 2) BENADE et FRENCH (Jasa 1965) proposent une étude mathématique du rôle de la cavité du bouchon en fonction de la fréquence émise et pour différentes couvertures à l'embouchure.

Les modifications de fréquence provoquées par la cavité du bouchon et par la couverture à l'embouchure sont exprimées sous forme d'une correction de longueur Δl_e dont on étudie l'évolution avec la fréquence. Lorsque Δl_e est constant les partiels sont " justes " (multiples entiers de la fréquence du fondamental). Si Δl_e croît avec la fréquence les partiels sont d'autant plus abaissés qu'ils sont plus aigus et inversement.

Les auteurs traduisent la couverture à l'embouchure de la façon suivante : un 2ème bouchon étant placé dans la tête symétriquement par rapport au premier, on obtient un résonateur dont on peut calculer la 1ère fréquence de résonance (f_x) en fonction de l'ouverture du trou d'embouchure. En demandant par ailleurs à un musicien de jouer la tête ainsi modifiée comme s'il s'agissait de la flûte, on peut estimer, d'après le son qu'il émet, de quelle quantité il couvre le trou.

fig.19

Les résultats, calculés pour trois positions du bouchon et trois couvertures de l'embouchure sont montrés fig.19. Ils concordent avec ceux de notre expérience; en particulier les auteurs soulignent que pour $b = 17$, et une couverture moyenne de l'embouchure, Δl_e est constant. Toutefois ils posent comme postulat qu'en jeu " normal " la couverture de l'embouchure est constante quelle que soit la fréquence, alors que nous savons (cf. § 2.61) que le flûtiste doit couvrir d'autant plus l'embouchure qu'il va vers l'aigu. Il n'y a donc pas de position idéale du bouchon, mais une bonne place pour chaque son (cf. BOEHM (1) p.37) ce qui est évidemment impraticable. Nous avons vu que l'abaissement dû à la couverture de l'embouchure dans l'aigu était compensé par la conicité de la tête de la flûte Boehm. La bonne place du bouchon est un compromis. L'expérience suivante faite dans les conditions normales de jeu nous le confirme.

§ 4.37 - Flûte traversière à une clé (cylindro-conique) - Expérience du déplacement du bouchon.

- 1) Champ de liberté en fréquence de l'instrument :

En procédant de façon habituelle (cf § 4.24) nous relevons le champ de liberté en fréquence complété par des mesures de fréquence en cours de jeu, ce qui permet de le réduire à une zone plus significative. Nous répétons cette opération pour cinq positions différentes du bouchon. Les résultats sont montrés fig.20 où, pour plus de clarté nous n'avons représenté que les principaux sons de l'instrument. Dès l'octave de R4 on constate un effet qui croît très vite avec la fréquence : plus le bouchon est loin de l'embouchure, plus la fréquence est abaissée. Dans les conditions de l'expérience, pour $9 < b < 29$ l'écart atteint presque 1/2 ton pour DO #5 et RE 5. L'optimum pour cet instrument et ce musicien est obtenu pour $b = 19$.

fig.20

2) Spectrographie :

fig.21

Musiciens et facteurs savent que la place du bouchon ne modifie pas seulement la justesse mais aussi la sonorité. Nous avons demandé au musicien de jouer legato (gamme chromatique) et détaché (fragment de mélodie) pour trois positions du bouchon. L'analyse au sonographe (fig.21) confirme l'observation des musiciens (cf ROCKSTRO § 3.31). Bouchon rapproché, les notes graves sont faibles et instables au détriment des notes aiguës, d'émission facile; en jeu détaché on note un important bruit de souffle. Bouchon éloigné, les phénomènes sont inversés; on constate de plus que la différence spectrale entre les sons de base et les sons de fourche est atténuée.

§ 4.38 -- Conclusions

L'excitation transversale d'un tuyau ne peut se faire dans de bonnes conditions que si le bouchon qui limite le tuyau est à une certaine distance du trou d'embouchure. La cavité ainsi laissée par le bouchon tend alors à abaisser la fréquence des partiels supérieurs. La place " idéale ", déterminée empiriquement est un compromis entre :

- la fermeture partielle à l'embouchure (couverture) et la conicité,) qui tendent à agrandir les intervalles entre les partiels
- les trous latéraux,) qui tendent à diminuer les intervalles entre les partiels
- l'augmentation de couverture à la bouche, avec la fréquence,) qui tend à abaisser l'aigu

Agissant principalement sur les aigus, le bouchon permet au musicien et au facteur un réglage sur mesure, un ajustement de la justesse et de la sonorité. En ce sens il est bien, selon Quantz " l'âme " de la flûte, (cf. Bib. I § 10).

Pour la flûte Boehm il est d'usage de placer le bouchon à 17 ou 18 mm du centre de l'embouchure, ce qui correspond au diamètre du tuyau à cet endroit. C'est la valeur préconisée par BOEHM ((2) p. 20 et 108).

Pour la flûte cylindro-conique à une clé nous n'avons pas de recommandation numérique précise. Etant donné les différences de perce entre les instruments, l'emploi de corps intermédiaires pour modifier le diapason, le flûtiste devait savoir régler la place du bouchon selon les besoins. La méthode préconisée par QUANTZ (I 11,12 et IV 26) consiste à comparer la justesse des octaves RE3 RE4 et RE4 RE5, qui doivent être bonnes à l'oreille. La distance b doit être diminuée lorsqu'on allonge la flûte. Voici à titre d'exemple les réglages pratiqués par un musicien sur une flûte à une clé dont le diamètre au niveau du bouchon est de 19 mm. L est la longueur de l'instrument prise depuis le centre de l'embouchure ($d = 9$ mm) jusqu'à l'extrémité.

$$L = 556 \text{ mm (petit corps),} \quad b = 23 \text{ mm.}$$

$$L = 564 \text{ mm (grand corps),} \quad b = 19 \text{ mm.}$$

On voit que pour un allongement de 8 mm de la flûte il faut rapprocher le bouchon de 4 mm pour conserver la justesse des octaves.

Le réglage du bouchon pouvait même se faire en cours de jeu : " Pour modérer le ton de la flûte et jouer plus doucement; comme cela doit se faire dans l'Adagio, il faut couvrir l'embouchure un peu plus de la lèvre qu'on n'a enseigné ci-dessus, mais comme la flûte devient par là un peu plus basse, il est nécessaire qu'il y ait une vis au bouchon qui est dans la tête, moyennant laquelle on puisse presser le bouchon hors de sa situation ordinaire, la largeur d'un bon dos de couteau plus bas dans la flûte...
..../"

Par là la flûte devient d'autant plus courte et par conséquent plus haute, et l'on peut de cette manière rester toujours d'accord avec les autres instruments ". (QUANTZ IV.26)

B - PROBLEMES RELATIFS A L'ORGUE

§ 4.39 - Généralités

Nous avons, au cours de cette étude rendu compte de quelques expériences faites avec des tuyaux d'orgue posés sur " mannequin " (*1), qui ont permis d'éclairer le fonctionnement du tuyau à bouche, mais l'utilisation des tuyaux y est assez particulière :

L'emploi d'une soufflerie mécanique permet d'alimenter les tuyaux avec un débit et une pression quasi stables, pouvant atteindre de fortes valeurs si on le désire, et pendant une durée illimitée. L'air utilisé n'est pas saturé d'humidité et reste à température constante pendant la durée d'utilisation.

A part quelques exceptions (flûte harmonique) tous les tuyaux d'orgue fonctionnent en régime 1, sans trous latéraux.

Un tuyau est construit et réglé pour émettre une seule note; on peut lui donner un fonctionnement optimal pour la fréquence, l'intensité et le timbre désirés.

Instrument polyphonique de grande étendue l'orgue pose donc un grand nombre de problèmes spécifiques :

1) L'étude d'un tuyau isolé n'a pas de sens; l'unité est le jeu (de 54 à 56 tuyaux) dont il faut étudier l'évolution sur 2 à 4 octaves : évolution des proportions des tuyaux, des réglages en intensité, en timbre

2) Du fait de la multiplication des tuyaux il se produit entre eux des interactions complexes. Les corps des tuyaux voisins muets, provoquent des modifications par résonance, absorption.

En jeu polyphonique, on observe des réactions des tuyaux les uns sur les autres surtout s'ils sont sur le même " vent " (*2) : modifications de fréquence, d'intensité, de timbre.

3) La possibilité d'associer des jeux de fréquence différente (mixtures, fournitures) permet d'enrichir à volonté le timbre et de modifier l'attaque.

4) Du fait de l'existence de jeux à l'octave les uns des autres l'étendue réelle de l'instrument est couramment de 7 octaves pour un instrument de 8' et atteint 9 octaves pour un 32' ce qui pose de difficiles problèmes pour harmoniser (timbre et intensité) car on sait que dans l'ultra grave et dans le suraigu l'oreille a des propriétés particulières. L'étude des proportions données empiriquement aux tuyaux et de leur réglage sonore serait riche d'enseignement pour les théoriciens.

5) On ne peut pas dissocier l'étude de l'orgue de celle du local dans lequel il est situé, le plus souvent une église, car l'instrument est réglé en fonction des

...../

(*1) - "mannequin" : dispositif mécanique comprenant les éléments nécessaires (soufflerie, conduits d'air, soupapes, clavier) pour essayer les tuyaux en atelier.

(*2) - "Vent" : on dit que deux tuyaux sont sur le même vent lorsqu'ils sont placés sur la même gravure : conduit d'air commun à tous les tuyaux commandés par une touche donnée.

propriétés acoustiques du lieu (cf. LEIPP (4)).

Nous nous proposons maintenant d'examiner de plus près quelques uns de ces problèmes.

§ 4.40 - Action réciproque de deux tuyaux voisins

Il y a dans l'orgue des centaines de tuyaux placés côte à côte. Le fonctionnement d'un tuyau donné dépend en grande partie des tuyaux environnants qui sont autant de résonateurs (absorbeurs passifs) modifiant simultanément le timbre et la fréquence. (cf. BENAËL).

Lorsque deux tuyaux de fréquence voisine sont placés l'un près de l'autre et jouent simultanément, les phénomènes deviennent très compliqués. Voici les résultats d'une expérience faite sur mannequin.

Deux tuyaux de taille moyenne ont respectivement pour fréquence A : SOL # 3 + 10 savarts et B : SOL # 3 + 13 savarts. Les tuyaux étant placés sur une même gravure, très près l'un de l'autre (15 mm entre les corps) nous pouvons les orienter de différentes façons :

1) tuyaux côté à côté : bouches tournées du même côté



2) tuyaux face à face : bouches vis à vis



3) un tuyau devant l'autre :

a) la bouche de A regarde le dos de B



b) la bouche de B regarde le dos de A



Pour chaque disposition nous avons joué les tuyaux l'un après l'autre, puis simultanément; les écarts en savarts sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Position des tuyaux	A seul	B seul	A + B
côte à côté (1)	SOL # 3 + 10	SOL # 3 + 13	SOL # 3 + 12
face à face (2)	↗ SOL # 3 + 13	↗ SOL # 3 + 17	↗ SOL # 3 + 17
A face dos de B (3a)	↘ SOL # 3 + 8	↘ SOL # 3 + 12	Battelements ou ROULEMENTS
B face dos de A (3b)	= SOL # 3 + 10	\ SOL # 3 + 10	SOL # 3 + 10

Lorsque les deux tuyaux sont placés l'un à côté de l'autre, la fréquence produite en les jouant simultanément est légèrement inférieure à celle du plus aigu des deux. L'un des tuyaux, le plus " fort " (B) entraîne l'autre et l'oblige à fonctionner à sa fréquence; l'accommodation s'accompagne d'une petite modification de fréquence du tuyau " fort ".

Les deux tuyaux étant placés face à face il se produit un véritable couplage : la fréquence du système est nettement supérieure à celle de chacun des tuyaux placés côte à côte (1). Ce phénomène, conforme à la théorie, semble pourtant paradoxal, car les deux tuyaux étant très proches l'un de l'autre on pourrait s'attendre à un abais-

...../



sement de la fréquence provenant du recouvrement partiel des bouches. Pour estimer celui-ci nous avons mesuré la fréquence dans les positions 3a et 3b : on trouve environ 2 savarts.

Il semble que le couplage véritable ne se produise que rarement dans l'orgue. Le système fonctionne d'ailleurs très mal : le son est sourd, instable, d'attaque difficile. Par contre les phénomènes d'accomodation, d'entraînement, se produisent inmanquablement et posent de difficiles problèmes au facteur au moment de l'accord et de l'harmonisation. Ainsi Dom BEDOS (§ 2 07) fait remarquer : " il ne faut presque rien pour faire discorder un tuyau; il suffit de l'ôter de sa place et le remettre tout de suite, pour qu'il ne soit plus d'accord. Si on le tourne un peu d'un côté ou de l'autre, il perd son accord ".

§ 4.41 - Un jeu d'orgue : évolution des dimensions des tuyaux

Note : au cours des paragraphes qui suivent nous utiliserons abondamment les mesures des " DO " des différents jeux de l'orgue de MOLLAU, publiées par M. MEYER-SIAT (cf. Bib).

Selon Dom BEDOS (§ 1.36) " Ce qu'on appelle un jeu dans l'orgue est une rangée d'un certain nombre de tuyaux de même espèce, posés ordinairement sur un même registre, qui forment une suite de tons en progression chromatique, de l'étendue convenable à sa qualité ".

Tous les tuyaux d'un jeu sont construits selon des proportions similaires déterminées par le " diapason du jeu ", selon le terme des organiers. " Le Diapason d'un jeu doit contenir les 2 principales dimensions des tuyaux, la longueur et la largeur " (Dom BEDOS § 2.10).

Pour tracer le " diapason " on porte sur l'axe Ox les longueurs des tuyaux (inversement proportionnelles à la fréquence). Le rapport des longueurs de deux tuyaux à l'octave est 1/2, à la quinte 3/2 etc... En Oy on porte les diamètres. Il suffit de connaître le diamètre du 1er et du dernier tuyau du jeu et de joindre les deux points par une ligne droite pour trouver ceux des tuyaux intermédiaires.

1) Comparons les dimensions des DO du prestant dont Dom BEDOS donne le diapason :

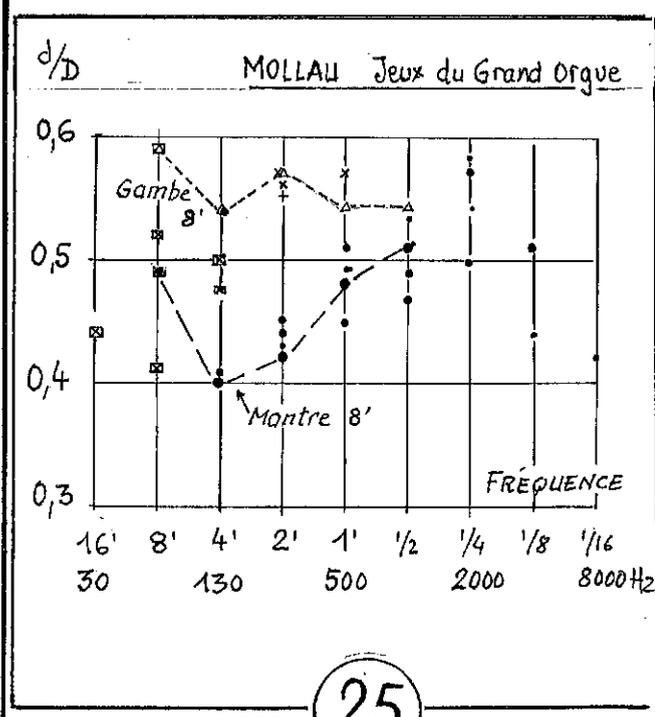
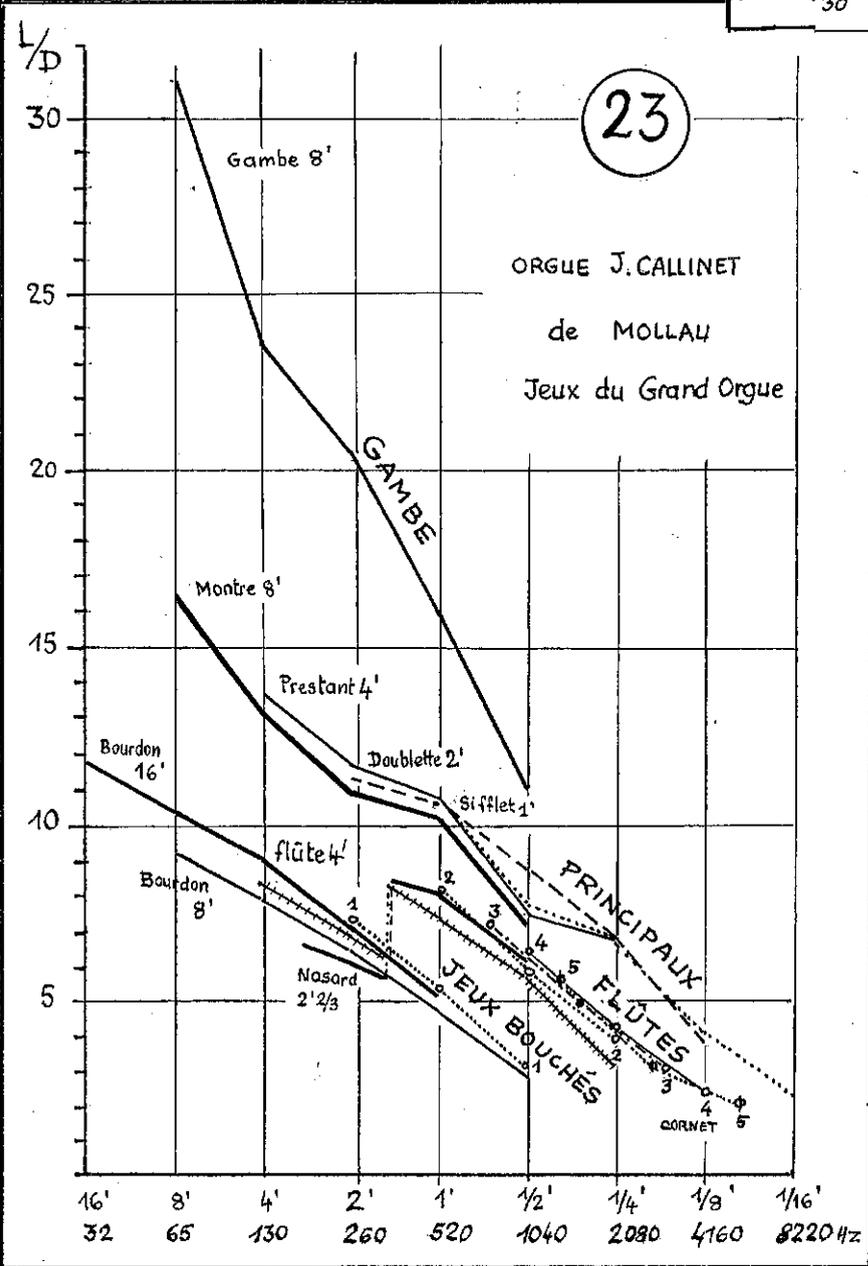
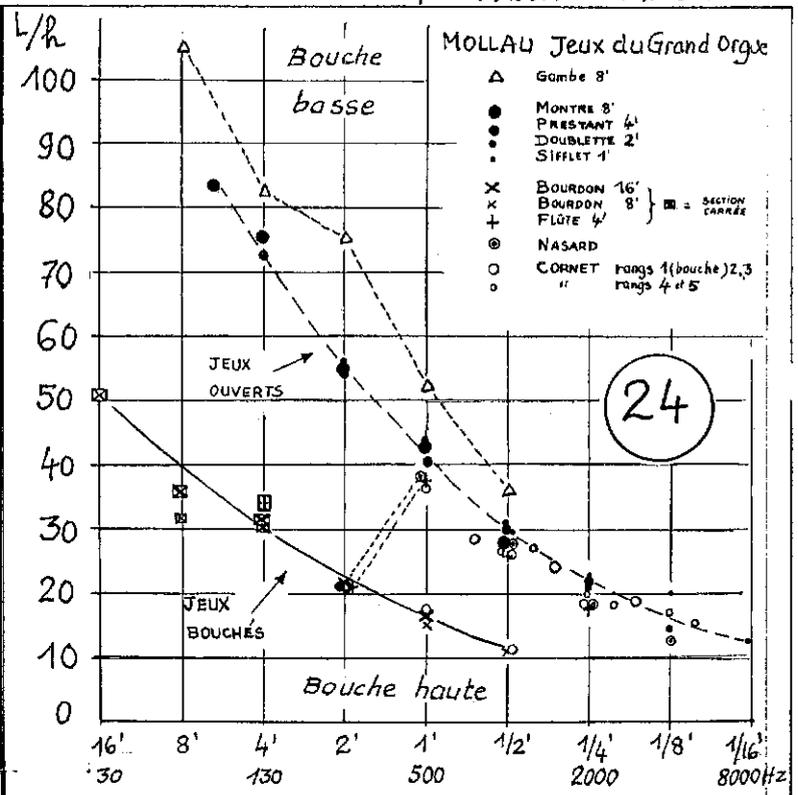
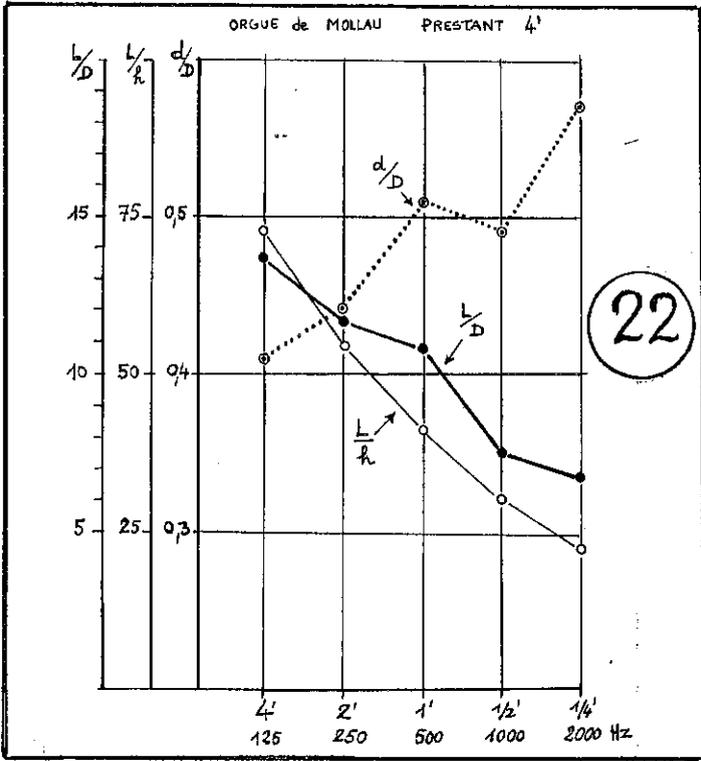
Tuyau N°	1	13	25	37	49
L (mm)	1300	650	325	163	82
D (mm)	94,5	52,5	31,5	21,2	16,5
L/D	13,7	12,4	10,3	7,7	4,9

Le diamètre n'étant pas réduit dans les mêmes proportions que la longueur il s'ensuit que le rapport L/D se modifie avec la fréquence : la taille du tuyau grossit d'autant plus qu'il devient plus petit.

fig. 22
PL. 91

On peut voir fig. 22 les mesures du prestant de Mollau. La progression est un peu différente de celle donnée par Dom BEDOS. Partant de la même valeur pour le tuyau de 8', elle grossit moins vite en allant vers l'aigu.

..../



25

- 2) La hauteur de bouche (h) est en rapport avec la largeur (l). Dom BEDOS donne $h = 1/5$ pour les tuyaux ouverts et $h = 1/4$ pour les tuyaux bouchés. A MOLLAU, les mesures des DO du prestant sont successivement, en partant du DO le plus grave vers le plus aigu : $l/h = 3,82$; $3,55$; $3,04$; $2,93$. La valeur du rapport l/h est toujours inférieure à 4 et diminue avec la fréquence. Toutefois ce rapport est difficile à interpréter. En théorie, la largeur de la bouche est le $1/4$ de la circonférence du tuyau, mais ce rapport peut également varier, et lorsqu'on compare des jeux différents la taille entre en ligne de compte.

Ex. pour deux tuyaux de 8'
de Mollau :

	l/h	h (mm)	l (mm)
Gambe 8'	3,18	22	70
Montre 8'	3,5	32	112

La gambe ayant un diamètre beaucoup plus faible que la montre le rapport l/h est plus petit alors qu'on voit bien que sa hauteur de bouche est bien plus basse que celle de la montre.

fig. 22

Il est plus significatif de considérer le rapport de la hauteur de la bouche à la longueur du tuyau. Toujours pour le prestant de Mollau on voit que l/h diminue avec la fréquence (fig. 22). Du 1er au dernier tuyau il passe de 72,5 à 22,5 : l'équivalence est donc pratiquement 4 fois plus important dans l'aigu du jeu. Le grossissement de la taille et l'augmentation de la distance lumière biseau pour les tuyaux aigus contribuent à renforcer la prédominance du fondamental pour ces tuyaux.

- 3) Pour apprécier le degré de " justesse " des partiels il est intéressant d'examiner le rapport de la surface de la bouche à la section du tuyau au même endroit; ou bien, pour comparer avec les expériences décrites au § 3.02 (fig.4 - PL.32) le rapport des diamètres d/D des deux ouvertures en prenant : $d = \sqrt{\frac{4 l \cdot h}{\pi}}$

On voit, toujours sur la figure 22, que ce rapport passe de 0,4 pour le tuyau le plus grave du prestant à 0,6 pour le plus aigu. Mais nous savons que, pour une même valeur de d/D la fausseté des partiels est d'autant plus grande que la taille est plus grosse : l'accroissement de l'ouverture relative de la bouche peut donc compenser la fausseté due au grossissement de la taille dans l'aigu.

§ 4.42 - Dimensions comparées des différents jeux

Comparons l'évolution des rapports L/D L/h et d/D pour différents jeux de l'orgue de Mollau (jeux du grand-orgue).

fig. 23

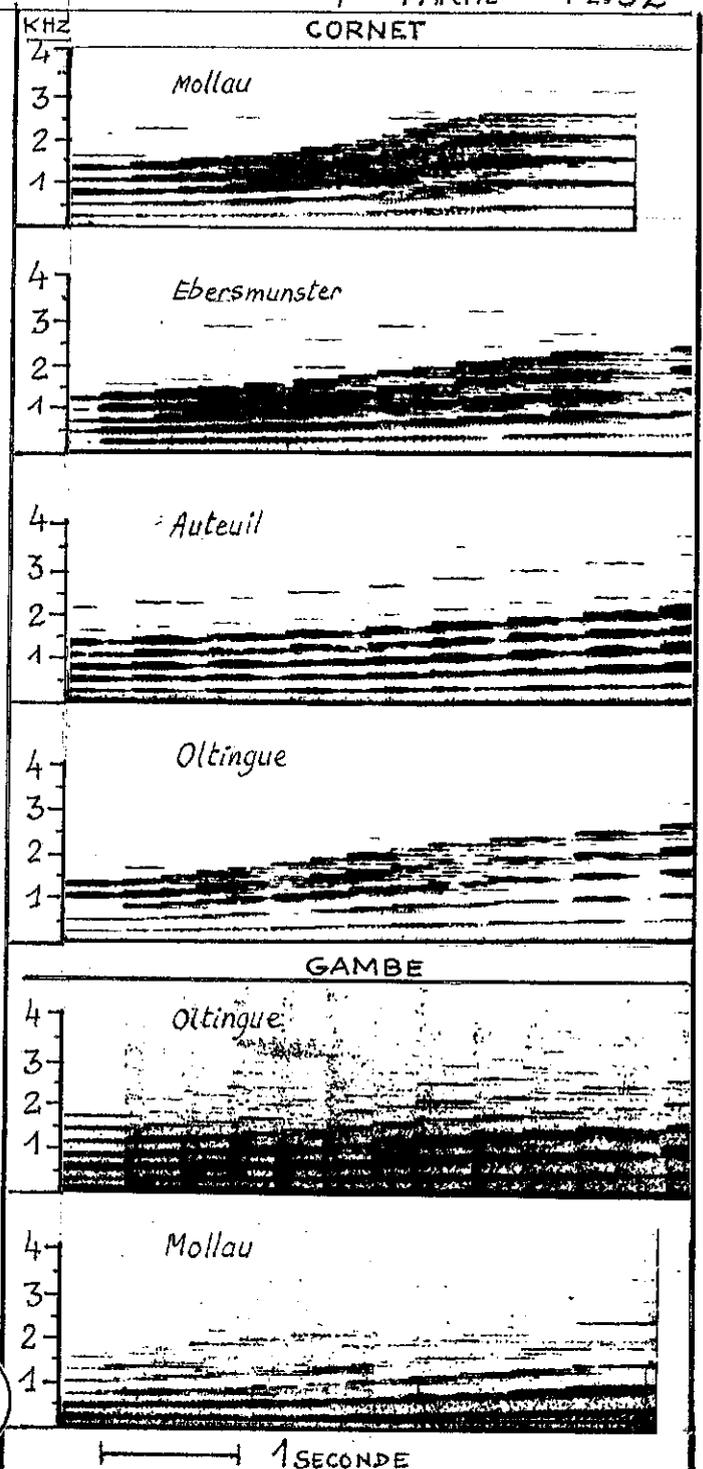
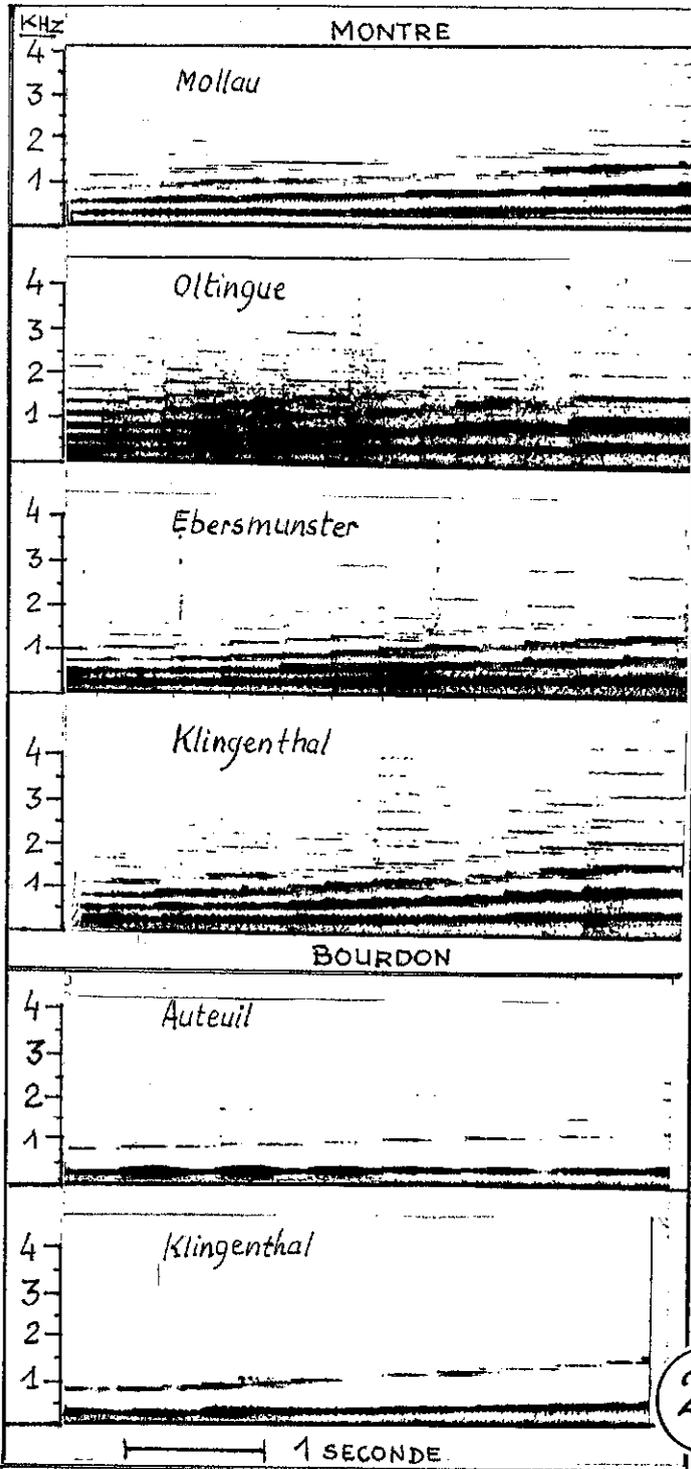
L/D taille). On retrouve les principales familles de tuyaux qui sont, en allant de la plus fine vers la plus grosse taille : gambe, principaux, flûtes, jeux bouchés. La variation est plus rapide pour la gambe qui passe de $L/D = 32$ à 11, sur 4 octaves. La limite pratique du rapport L/D est d'environ 2. La " bosse " que l'on constate sur les principaux (500 Hz) n'est sans doute pas accidentelle; il faudrait les mesures d'un plus grand nombre de tuyaux pour l'interpréter.

fig. 24

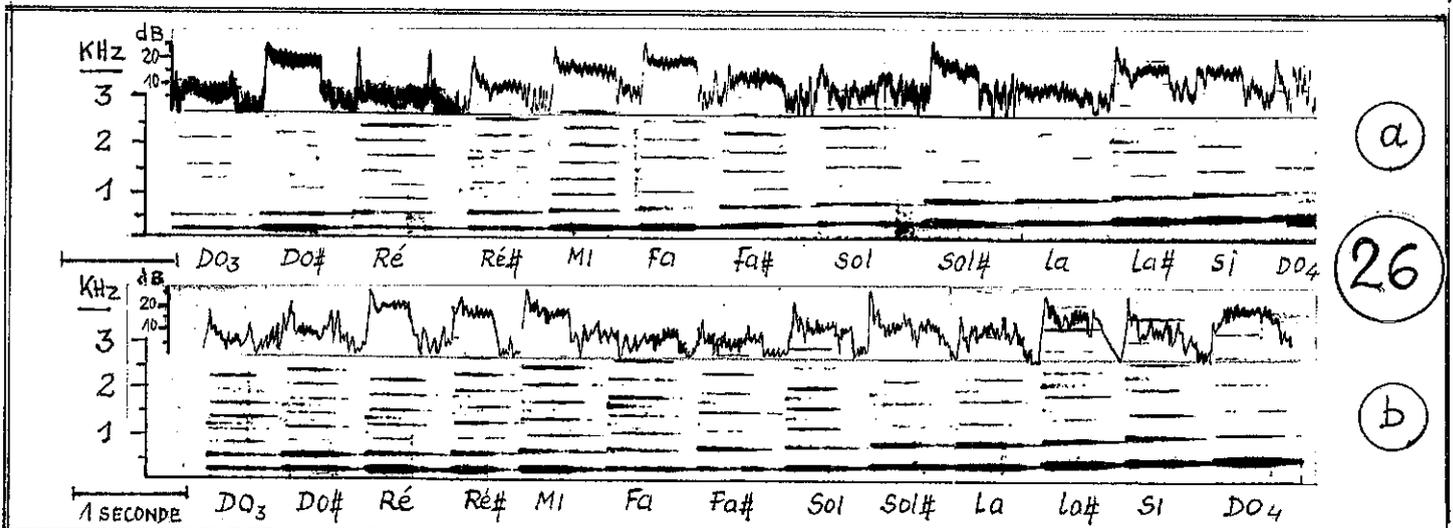
L/h - Les familles principales sont également bien distinctes, surtout dans la partie centrale, de DO2 à DO5. Les flûtes sont, pour cet instrument très proches des principaux.

Les courbes, semblables à L/D jusque vers 1000 Hz diminuent moins vite à partir de cette fréquence : le tuyau devant conserver une attaque suffisamment nette. Pour les dimensions absolues de la bouche voir fig. 71 - PL. 26.

.... /



28



26

fig. 25 d/D - L'évolution du rapport d/D est semble-t-il plus complexe. On trouve tous les tuyaux entre 0,4 et 0,6. Les tuyaux de plus fine taille ont aussi la plus grande ouverture relative à la bouche, ce qui accentue le caractère "harmonique" des partiels. On remarque, pour les principaux un accroissement du rapport d/D de 130 à 2000 Hz, ce qui correspond à l'observation que le bruit de bouche est plus perceptible dans les basses, étant plus inharmonique. Au delà de 2000 Hz d/D diminue : nous ne sommes pas en mesure de l'expliquer.

Bref, un jeu est caractérisé du point de vue acoustique par les lois d'évolution des principaux paramètres en fonction de la fréquence. Prenons deux exemples, toujours pour l'orgue de Mollau :

La gambe 8'	Taille fine	31	$< L/D < 11$
	Bouche basse	105	$< L/h < 35$
	grande ouverture à la bouche	0,55	$< d/D < 0,6$
La montre 8'	Taille moyenne	16	$< L/D < 7$
	Bouche moyenne	80	$< L/h < 30$
	Ouverture à la bouche	0,4	$< d/D < 0,5$

En fixant les rapports de fréquence des partiels ces proportions prédéterminent l'allure spectrale des tuyaux d'un jeu :

- intensité relative des harmoniques
- inharmonicité des partiels d'attaque (plus " faux " dans la montre que dans la gambe).

Les familles de jeux évoluent de façon distincte, donc restent bien reconnaissables quelle que soit la tessiture.

Le réglage de la bouche n'en est pas moins capital et ce n'est qu'au cours de l'harmonisation que le facteur pourra donner aux tuyaux d'un jeu leur véritable caractère, en tenant compte implicitement des caractéristiques acoustiques du local, de la place du jeu dans l'instrument et des propriétés du système auditif humain " statistique ". Donnons un exemple.

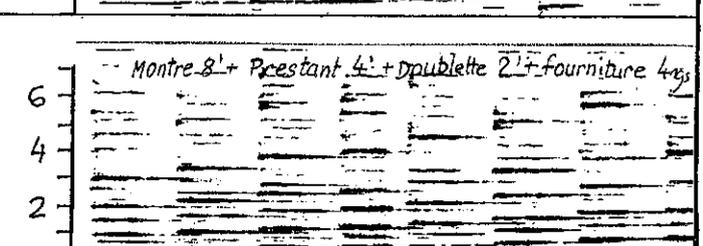
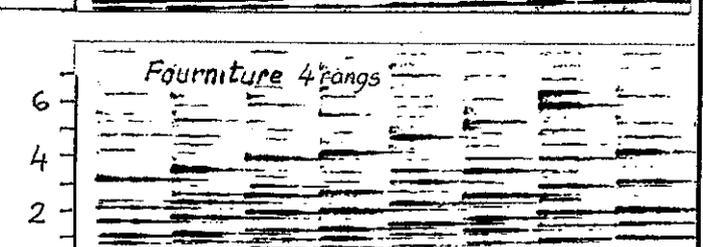
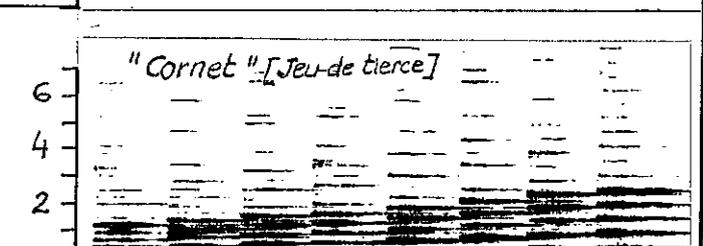
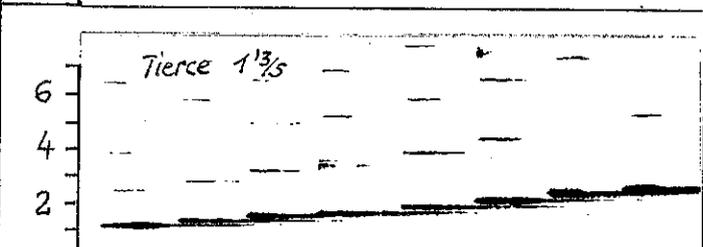
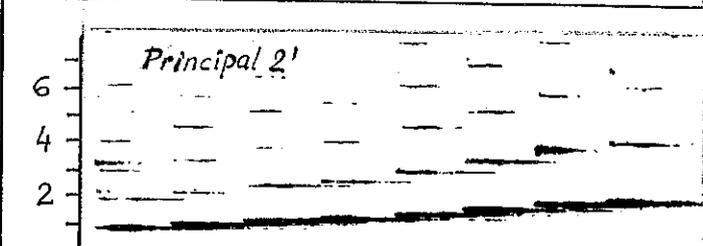
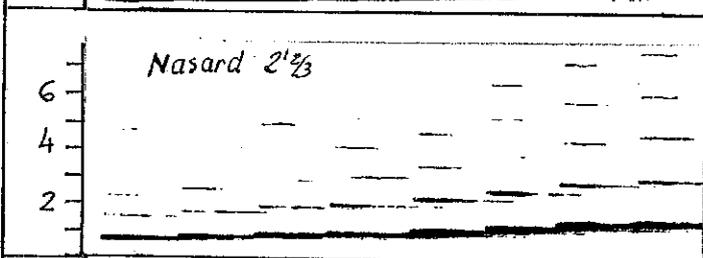
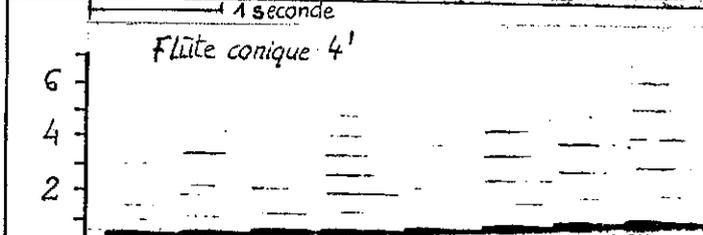
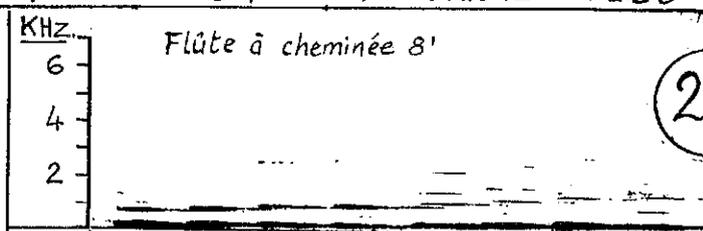
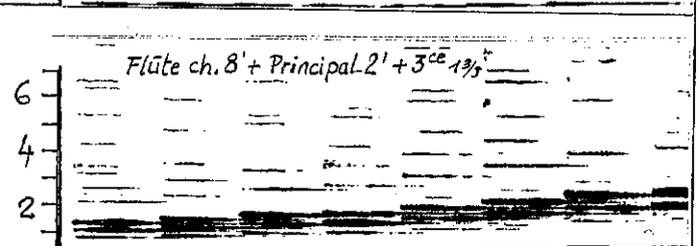
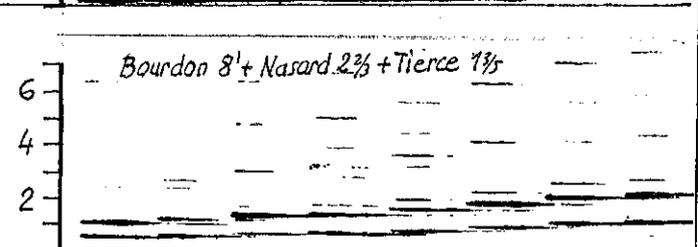
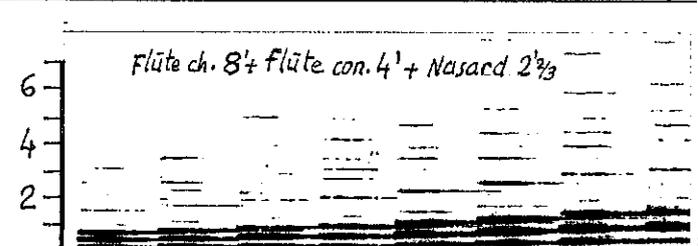
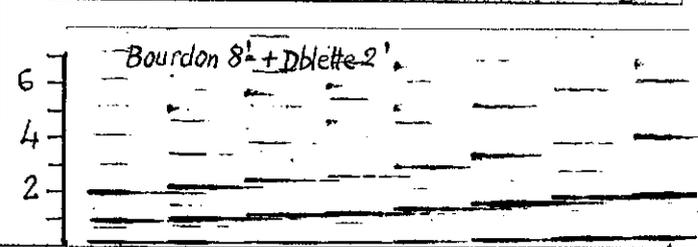
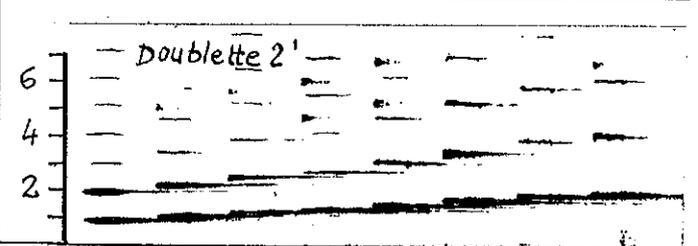
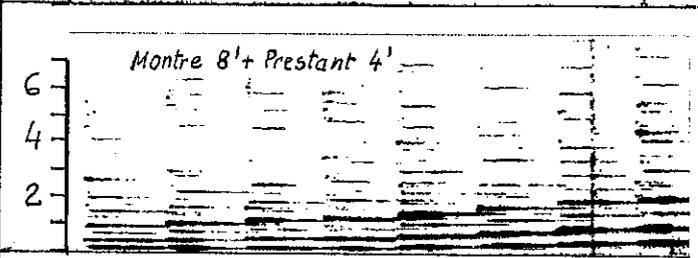
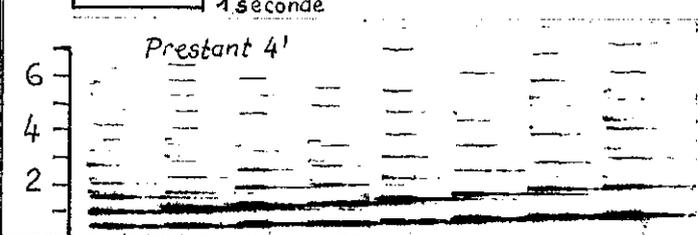
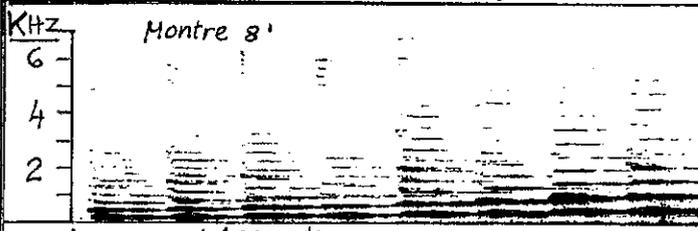
§ 4.43 - Analyse sonographique d'un jeu avant et après harmonisation

Grâce à l'amabilité du facteur J.G. KOENIG nous avons pu enregistrer un jeu avant l'harmonisation. Il s'agit de la flûte conique 4' du positif.

fig.26
PL. 92

En (a) on joue les tuyaux de la deuxième octave qui viennent juste d'être posés sur le sommier. Ils " parlent " tous mais de façon très inégale : SOL \sharp et LA sont très sourds, RE " grésille ", DO est faible etc... Il faut d'abord recouper les tuyaux prévus volontairement trop longs, pour dégrossir l'accord, puis égaliser grossièrement l'intensité en agissant principalement sur l'ouverture du pied. On peut alors toucher de plus près la bouche pour parfaire la sonorité et l'attaque. Toute action modifiant simultanément plusieurs paramètres il faut reprendre plusieurs fois de suite le travail, opérer par retouches successives. Le problème est compliqué par le fait que l'harmoniste qui agit sur le tuyau entend celui-ci de très près donc de façon " anormale " et doit se fier à un aide qui, du clavier, juge de la qualité et de l'homogénéité des sons.

...../



En (b) les tuyaux sont harmonisés de façon satisfaisante. Par comparaison avec (a) on peut constater que tous les tuyaux, à l'exception de MI et LA \sharp ont été retouchés.

Bien que les tuyaux donnent maintenant un son similaire on peut voir qu'il n'y en a pas deux qui soient parfaitement semblables. Dans l'ensemble les tuyaux sont riches en harmoniques de rang élevé, ont une attaque franche avec un bruit de bouche assez intense, qui accroche le plus souvent le partiel 4. La courbe d'intensité que nous avons reproduite ne traduit pas du tout l'impression auditive. Les tuyaux sont, à l'oreille, d'intensité à peu près égale, alors que la courbe montre des différences de 15 dB, qui reflètent essentiellement les différences d'intensité du fondamental. La métrologie conventionnelle est ici d'un faible secours.

§ 4.44 - Spectrographie de quelques jeux d'orgue

fig.27
PL. 93

Nous avons rassemblé sur la planche 93 les analyses de quelques jeux de l'orgue d'Auteuil (J.G. KOENIG). Pour des raisons pratiques nous nous sommes limitée aux notes diatoniques de l'octave DO 25, DO 37. (*)

a) Jeux isolés simples

- La montre : C'est un des jeux à bouche le plus riche en harmoniques de tous rangs (une dizaine). L'harmonique 2 de forte intensité devance les autres au moment de l'attaque.

Les bruits de bouche, assez nombreux sont visibles dans la zone de 5000 Hz (notes MI, FA, SOL), et, sous forme de partiel d'attaque (La 5°), sur les notes RE, MI, SOL, SI.

- Le prestant : De proportions et d'harmonisation similaire il est la suite logique de la montre dont il présente les mêmes caractéristiques.

- La doublette : C'est aussi un principal. Elle est traitée ici avec une attaque très franche, quasi percutante, par laquelle elle diffère du principal 2' que l'on voit en vis à vis.

- Flûte à cheminée 8' : Ce jeu, partiellement formé (cf. § 3.54) est harmonisé de façon à produire essentiellement les harmoniques 1 et 3.

- Flûte conique 4' : Ce qui frappe ici est l'absence d'harmonique 2 alors que les harmoniques 3,4 et 5 sont bien visibles.

- Le nasard et la tierce : de taille plus grosse que les principaux montrent une large prédominance du fondamental. Ils sont destinés à être mélangés à d'autres jeux.

b) Jeux composés

La fourniture : elle comprend dans cet instrument, 4 rangs de tuyaux riches en harmoniques, qui produisent un grand nombre d'additionnels et de différentiels (cf. SI 36), rentrant dans la série des harmoniques d'un jeu de 8'.

c) Associations de jeux

Une des originalités fondamentales de l'orgue est la possibilité de combiner plusieurs jeux parlant simultanément. On peut ainsi :

- modifier de façon plus ou moins importante le timbre d'un jeu donné, en renforçant un ou plusieurs harmoniques,

* NOTE : DO 25 ; le numéro désigne ici la n^{ième} touche du clavier de l'orgue.1

- créer des timbre nouveaux par synthèse de jeux en rapport harmonique entre eux,
- modifier l'attaque d'un jeu.

En voici quelques exemples.

Montre et prestant - L'association de ces 2 jeux, à l'octave l'un de l'autre est caractérisée par un timbre " clair " (harmoniques 2 et 4 prédominants) et une attaque franche comportant de nombreux bruits de bouche.

Bourdon 8' et doublette 2' - L'ensemble conserve le caractère de bourdon en raison de l'absence totale d'harmonique 2, mais l'attaque précise, qui permet un jeu rapide, orné, restant intelligible, en est la principale caractéristique.

Selon les combinaisons on peut obtenir le renforcement des harmoniques :

- 1, 2 et 3 (flûte 8, flûte 4 et nasard)
- 1, 3, 5 (Bourdon 8, nasard et tierce)
- 1, 3, 4 et 5 (flûte cheminée 8, principal 2 et tierce).

La combinaison la plus remarquable est le jeu de tierce qui comprend flûte à cheminée 8, flûte conique 4', nasard 2' 2/3, principal 2' et tierce 1' 3/5; cet ensemble prend le nom de cornet lorsque les 5 rangées de tuyau sont sur une même gravure. On peut voir sur la planche 93 les cinq jeux analysés séparément et le jeu de tierce qui montre clairement le renforcement des 5 premiers harmoniques, le 5ème étant d'ailleurs le plus intense.

fig. 28

Nous avons reproduit, fig. 28 une gamme enregistrée sur des cornets d'orgues différents. On remarquera, par comparaison avec le jeu de tierce d'Auteuil, que l'augmentation de l'intensité des harmoniques 3, 4, 5 (ou si l'on préfère, l'affaiblissement du fondamental) y est très accusée. Les tuyaux n'étant pas susceptibles d'être utilisés dans d'autres combinaisons peuvent être équilibrés de façon optimale. De plus, étant sur le même vent ils peuvent être parfaitement synchronisés en fréquence et donner véritablement l'illusion d'un jeu unique de timbre particulier.

Les analyses de la figure 28 montrent combien, au travers de la diversité des instruments et des locaux, les jeux de base sont bien individualisés et leur allure spectrale et auditive aisément reconnaissable.



CONCLUSION GENERALE

L'étude expérimentale des tuyaux à bouche est difficile. Le nombre et l'interdépendance des paramètres ne permet pas toujours d'interpréter clairement les résultats des expériences. L'intérêt de celles-ci est d'ailleurs limité aux conditions d'utilisation similaires. Nous nous sommes efforcés de nous placer le plus souvent dans les conditions normales de fonctionnement des instruments de musique, afin d'en tirer des conclusions applicables aux cas réels.

Ainsi, au cours de l'étude expérimentale des paramètres du système excitateur nous avons pu montrer, grâce à l'analyse sonographique, le rôle du son de bouche dans le mécanisme de l'attaque du tuyau. Nous avons vu que les différents types d'embouchures (bec, traversière, oblique) de même que les fréquences propres du tuyau, déterminent la composition spectrale du transitoire d'attaque, lequel est un élément fondamental du timbre.

Le fonctionnement polyphonique d'un tuyau entretenant simultanément plusieurs partiels non harmoniques a plus particulièrement retenu notre attention. Ce phénomène, connu depuis longtemps, mais soigneusement évité dans la musique occidentale jusqu'à ces dernières années, montre bien la complexité de l'entretien à la bouche. Nous en avons analysé un exemple de façon détaillée.

L'étude des paramètres de la bouche nous a permis de montrer le rôle capital du réglage de l'orientation du jet sur le timbre des tuyaux à bouche (composition spectrale et attaque). Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre certaines particularités du timbre attribuées généralement sans preuves au matériau, et corroborent les observations des pédagogues de la flûte traversière.

Dans la troisième partie nous avons étudié le rôle des principaux paramètres du tuyau proprement dit, toujours excité à l'aide d'une bouche. L'existence de celle-ci implique nécessairement le fait qu'il s'agit de tuyaux partiellement fermés à cette extrémité. Nous avons examiné tout d'abord les conséquences sur la justesse des partiels; puis, à l'aide d'un dispositif expérimental particulier nous avons fait une série d'expériences systématiques pour déterminer le rôle de la place et du diamètre des trous latéraux. Nous avons pu montrer ainsi l'importance de la sélection qu'opère le système excitateur dans l'ensemble des sons possibles prévus par la théorie. Le dépouillement des résultats en fonction de la justesse des partiels, et l'analyse des intervalles musicaux obtenus en débouchant les trous successivement apportent, nous espérons, quelques éléments pour la compréhension des doigtés des flûtes et en particulier des sons de fourche, et justifient l'existence des deux types fondamentaux de flûtes à trous identiques équidistants : flûtes à tons et flûtes à demi-tons.

L'étude des rétrécissements locaux nous a permis de comprendre le bien-fondé de leur emploi en facture instrumentale : flûtes à rétrécissement terminal, flûtes à diaphragmes (ney), flûte à "gorge" (Nô-Khan). Ces rétrécissements ont pour but de corriger les intervalles entre les partiels et de favoriser l'émission des partiels de rang élevé.

Lors de l'expérimentation sur les tuyaux d'orgue à bouche à cheminée, nous avons retrouvé le rôle de la bouche dans le choix des partiels possibles du tuyau, expliquant ainsi le paradoxe des sauts de fréquence, et le fait que le tuyau émet le même fondamental pour différentes longueurs de la cheminée. L'analyse des courbes de fréquence des partiels en fonction de la longueur de la cheminée a permis d'expliquer la possibilité de multiphonie ainsi que le timbre particulier de ces tuyaux dont nous avons fait une étude spectrographique au sonographe.

Le cas des tuyaux tronconiques et cylindro-coniques à bouche couramment employé en facture instrumentale a également retenu notre attention. Les expériences que nous avons faites s'appliquent plus particulièrement aux instruments européens de l'époque baroque, flûte à bec, flûte traversière, dont la perce longitudinale est justifiée par le système de trous latéraux et les variables de l'excitation étudiées dans les chapitres antérieurs.

L'étude du rôle du matériau sur les sons rayonnés par un tuyau à bouche pose, nous l'avons vu, de difficiles problèmes expérimentaux. A l'aide de quelques expériences volontairement " grossières " nous avons néanmoins pu montrer le rôle de l'état de surface interne du tuyau et celui de l'arête du biseau sur le timbre des tuyaux d'orgues.

Dans la dernière partie nous avons tenté d'utiliser les résultats expérimentaux que nous avons obtenus pour montrer, à propos de quelques instruments types, comment les facteurs, en combinant les variables en présence ont réalisé empiriquement des compromis résolvant au mieux les problèmes complexes posés par un instrument de musique : maniabilité, justesse, sonorité, intensité, en vue d'obtenir un résultat musical défini.

Les questions plus générales de la justesse et du timbre des flûtes nous ont permis de montrer que ces notions, étroitement dépendantes du musicien, exigent, pour être comprises, la connaissance des mécanismes auditifs.

Dans le dernier chapitre, nous avons effleuré quelques problèmes spécifiques à l'orgue (action réciproque de deux tuyaux voisins, proportions des tuyaux en fonction de la fréquence, etc.). Mais l'orgue est un " cas " compliqué que les limites du présent travail ne nous ont pas permis de développer plus amplement...

Ayant sur nos prédécesseurs l'avantage de disposer d'appareils permettant d'analyser l'évolution temporelle des sons instrumentaux, nous avons pu mettre l'accent sur l'étude spectrographique des phénomènes transitoires. Ceux-ci sont importants : ils constituent un élément essentiel de l'information acoustique, l'oreille étant avant tout un récepteur sensible aux variations temporelles rapides de la fréquence, de l'intensité, de la forme. Seules des contre-expériences de synthèse (par ordinateur en particulier) permettront de contrôler l'incidence d'un paramètre donné sur la perception du son des tuyaux à bouche, en particulier en ce qui concerne l'étude du timbre. Pour les entreprendre, cette étude apporte un certain nombre d'éléments qui, nous l'espérons, contribueront à l'avancement de la théorie des tuyaux à bouche.

BIBLIOGRAPHIE

Abréviations : GAM - Groupe d'Acoustique Musicale de l'Université PARIS VI.
ICA - International Congress on Acoustics.
JASA - Journal of the Acoustical Society of America.

AGRICOLA (M) - Musica instrumentalis deusch -
Wittenberg (1529)
fac-similé LEIPZIG 1896

- ANDO (Y.)
- (1) - " Acoustical study of a flute "
Technical Journal of Japan Broadcasting Corporation (1966)
vol. 18, p. 36-71.
 - (2) - A supplement of " Acoustical study of a flute " [Etude de la cavité
buccale du flûtiste]
Technical Journal of J.B.C. Vol. 19 N° 6 (1967) p. 65-69.
 - (3) - " Influence of the air beam direction upon acoustical properties of
flute tones "
Comptes-rendus du 6^e ICA, Tokyo, (1968).
 - (4) - " Drive conditions of a flute and their influences upon Sound ",
" Pressure level and Fundamental Frequency of Generated Tone ",
Journal of the acoustical Society of Japan, (1970), vol. 26
(p. 253/260 et 297/305).
 - (5) - " Etude acoustique du Nô-Kan ",
Technical Journal of Japan Broadcasting Corporation, Tokyo, (1970),
p. 143/158.

ARTAUD (P.Y.) et GEAY (G.) - Techniques contemporaines pour les flûtes.
A paraître.

BACKUS (J.) et HUNDLEY (T.C.) - " Wall vibrations in flue organ pipes and their effect
on tone "
J.A.S.A. - Vol. 39, N° 5 (1966), p. 936-945.

BACK (N.) - " Pitch, temperature and blowing pressure in recorder playing "
Acustica, Vol. 22 n° 5 (1969), p. 295-299.

BARTOLOZZI (B) - New sounds for woodwind instruments,
Oxford University Press, Londres, (1967.)

BEDOS (Dom) - L'art du facteur d'orgues,
Paris (1766) - 4 volumes
rééd. fac similé - Bärenreiter - KASSEL (1958)

- BENADE (A.H.)
- (1) - " Resonance - Absorption Cross section of a pipe organ.
J.A.S.A. Vol. 38 (1965), p. 780-789.
 - (2) - Relation of air column resonances to sound spectra produced by
a wind instrument.
J.A.S.A. Vol. 40 n°1 (1966), p. 247-249.
 - (3) - External surface absorption cross section of a pipe organ.
J.A.S.A. Vol. 41 n° 1 (1967), p. 32-38.

BENADE (A.H.) et FRENCH (J.W.) - Analysis of the flute head-joint.
J.A.S.A. vol. 37 N° 4 (1965), p. 679 à 691.

- BENZECRI et collab. - L'analyse des données.
DUNOD - Paris (1973).
- BERGER (D.P.) - The Nô-Kan : its construction and music.
in Ethnomusicology, Middleton, Connecticut, (1965) vol IX n° 3 (p. 221-239).
- BERNOULLI (D.) - Recherches physiques, mécaniques et analytiques sur le son et sur les tons des tuyaux d'orgue différemment construits.
Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, Année 1762, Imprimerie Royale, Paris (1764), p. 431/485.
- BOEHM (Th) (1) - De la fabrication et des derniers perfectionnements des flûtes.
Paris (1848) chez Clair Godéfroy aîné.
- (2) - The flute and flute-playing.
Traduction anglaise par Dayton C. Miller de " Die Flöte und das Flotenspiel ", Munich, 1871, éd. Dover, 1964.
- BONER (C.P.) et
NEWMAN (R.B.) - The effect of wall materials on the steady-state Acoustic spectrum of flue pipes.
J.A.S.A., vol. 12; p. 83-89 (1940).
- BOUASSE (H.) (1) - Jets tubes et canaux.
DELAGRAVE - PARIS (1923)
- (2) - Tuyaux et résonateurs,
DELAGRAVE - PARIS (1929)
- (3) - Instruments à vent,
DELAGRAVE - PARIS, T.I. (1929), T. II (1930)
- (4) - Tourbillons,
DELAGRAVE - PARIS, T.I. (1931), T. II (1932).
- (5) - Critiques et réfutation des théories exposées dans son ouvrage, tuyaux et résonateurs.
DELAGRAVE - PARIS (1948).
- BOUHUYS (A.) - (1) - Lung-volumes and breathing patterns in wind-instrument players.
Journal of applied physiology, vol. 19; p. 967-975a (1964).
- (2) - Sound-Power production in wind instruments,
J.A.S.A., (1965), vol. 37 n° 3, p. 453/456.
- BOUROT (J.M.) - Chronophotographie des vibrations d'un fluide.
Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'Air, Paris (1952)
N° 264, 80 p.
- BROWN (G.B.) (1) - On vortex motion in gaseous jets and the origin of their sensitivity to sound,
Proceeding of Physical soc. of London, (1935,) n° 47, p. 703/732.
- (2) - The Mechanism of edge-tone production,
Proceeding of Physical soc. of London, (1937,) n° 49 (p. 493/507).
- (3) - The Vortex motion causing edge tones,
Proceeding of Physical soc. of London, (1937,) n° 49 (p. 508/521).

- CARRIERE (Z.) (1) - Phénomènes à l'embouchure d'un tuyau d'orgue.
Journal de Physique et le Radium.
Paris (1925) - 6^e Série - p. 52-64.
- (2) - Harmoniques supérieurs des tuyaux à bouche de flûte, par vent très faible.
Journal de Physique et le Radium.
Paris (1926), p. 7 à 12.

CASTELLENGO (M.) :

- (1) - Le Galoubet et le tambourin de Provence.
Bulletin GAM n° 23 - Paris (1966).
- (2) - Instruments de musique traditionnels, instruments de musique électroniques.
Journées d'étude du festival du son. Chiron Ed. Paris (1967).
- (3) - Le problème de la justesse des flûtes.
C.R. des 4^e Conférences d'Acoustique. Budapest (1967).
- (4) - La flûte traversière.
Bulletin GAM n° 35. Paris (1968).
- (5) - Rôle du musicien dans les signaux rayonnés par la flûte traversière.
C.R. 6^e ICA. Tokyo (1968).
- (6) - La Musique du Théâtre Nô.
Bulletin GAM n° 39 - Paris (1969).
- (7) - Paramètres sensibles d'un tuyau d'orgue à bouche.
Bulletin GAM n° 42 - Paris (1969).
- (8) - Etude du déplacement continu d'un trou latéral dans un tuyau à bouche.
C.R. 7^e ICA - Budapest (1971) [Collab. Nagai]
- (9) - Sons multiples non harmoniques sur les tuyaux à bouche.
Bulletin GAM n° 74 - Paris (1974).
- (10) - Spectrographie des transitoires d'attaque des tuyaux à embouchure de flûte.
C.R. 8^e ICA - Londres (1974).
- (11) - Un problème de perception de la hauteur dans l'aigu et le suraigu.
Bulletin GAM n° 76 (1974).
- (12) - Etude spectrographique de quelques jeux d'un orgue.
à paraître dans " La Revue Musicale ". Ed. Richard - MASSE - Paris.

CAVILLE-COLL (A.) - Etudes expérimentales sur les tuyaux d'orgue.
Mémoire adressé à l'Académie des Sciences en (1840)
édité en 1895 par PLON et NOURRIT - 37 p.

CHANAUD (R.C.) et POWELL (A.) :

- (1) - Some Experiments concerning the Role and Ring Tone.
J.A.S.A. vol. 37 n° 5 - p. 902-911 (1965).

- COLTMAN (J.W.) (1) - Resonance and sounding frequencies of the flute.
J.A.S.A. - Vol. 40 - N° 1 (1966) - p. 99-107.
- (2) - Sounding mechanism of the flute and organ pipe.
J.A.S.A. - Vol. 44 - N° 4 (1968) - p. 983-992.

- COLTMAN (J.W.) (3) - Acoustics of the flute.
" Physics to day " - Vol. 21 - N° 11 - (1968)
- (4) - Mouth resonance effects in the flute,
J.A.S.A., vol. 54 - p. 417/420 (1973)
- (5) - Fifty flutists play one flute.
Woodwind world Brass and Percussion - Vol. 15 N° 2, p.31 (1976)
- CREMER L. et ISING (H.) - Messung and Berechnung der Wellenbewegung des windbandes bei eines Labialpfeife,
Comptes-rendus du 6° I.C.A. - Tokyo (1968)
- Die selbsterregten Schwingungen von Orgelpfeifen,
Acustica - Vol. 19 n° 3 - p. 143-153 (1967/68)
- ELDER (S.) - On the mechanism of sound production in organ pipes,
J.A.S.A., vol. 54 - p. 1554/64 (1973)
- ELLERHORST (W.) - Handbuch der Orgelkunde.
Verlaganstalt Benziger - EINSIEDELN (1936) - 830 pages
- ELSCHEK (O.) et STOCKMANN (E.) - Zur typologie der volksmusikinstrumente.
In Studia instrumentorum musicae popularis - T.I. (p.11-22).
Ed. Musik historiska museet - Stockholm (1969)
- FLETCHER (H.) - Speech and hearing in communication.
Ed. Van Nostrand. New-York (1929)
- FOCH (A.) - Acoustique,
Ed. Armand Colin, Paris (1934) - 210 pages.
- FRANSSON (F.) - Measurements of the head-joint perturbation and the embouchure reactance of flutes.
Speech Transmission Laboratory K.T.H. STOKHÖLM - STL - QPSR 4/1968 - p.15-22
- FRANZ (G.), ISING (H.), MEINHUSCH (P.) - Schallabstrahlung von Orgelpfeifen.
Acustica, vol. 22 n° 4 (p. 226/231). (1969)
- GANASSI (S.) - Opera intitulata Fontegara, la quale insegna a sonare di flauto...
Venise (1535)
Fac-similé Bolletino Bibliografica musicale, Milano, 1934.
- GILLE (J.C.), PELEGRIN (M.) et DECAULNE (P.) - Théorie et technique des asservissements.
DUNOD - PARIS (1956).
- GUITTARD (J.) (1) - Discontinuité au ventre d'un tuyau sonore.
Thèse - Toulouse (1946)
- (2) - Etude théorique de mouvements vibratoires avec obstacle et discontinuités
Acustica - vol.3 (1953) - p. 22-32.
- (3) - Tuyaux et résonateurs - Calcul et mesure de quelques résistances acoustiques.
Acustica vol.5 (1955)
- (4) - Impédances terminales de tuyaux sonores cylindriques.
Acustica vol.12 (1962) - p. 313-322
- (5) - Tuyaux sonores, variations de fréquences propres.
Acustica vol.20 n° 5 (1968) - p. 264-270

- HELMHOLTZ (H.) - On the sensations of tone.
Traduction anglaise de A.J. Ellis, éd. Dover, New-York, (1954).
Titre de l'édition originale : Die Lehre von den Tonempfindungen - 4ème Ed. (1877).
- HOTTETERRE (J.) - Principes de la flûte traversière ou flûte d'Allemagne, de la flûte à bec...etc.
Amsterdam (1728). Fac.similé Bärenreiter - Kassel (1965).
- HUNDT (E.) - The recorder and its music.
Herbert Jenkins ed. Londres (1962).
- ISING (H.) - Über die Tonbildung in Orgelpfeifen.
Comptes-rendus du 5^e I.C.A. - Liège (1965)
- JAMBE de FER (Philibert) - Epitome musical des tons, sons et accordz, es voix humaines, Fleustes.
Lyon (1556). Edité par la Société de Musique d'Autrefois - Paris. 1963
- KEELER (J.S.) - The attack transients of some organ pipes.
IEEE Transactions on audio, décembre (1972), vol. AU-20, n° 5 (p. 378/391).
- KRUGER (W.) - Eine Erregungsvorrichtung für Boehmflöten.
IV Conférences d'Acoustique de Budapest - Budapest (1967).
- LAMBERT (J.H.) - Observations sur les flûtes.
Nouveaux Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et belles-lettres,
Année 1775 - Frederic Voss éd. BERLIN - (1777).
- LAVIGNAC (A) et LA LAURENCIE (L.) - Encyclopédie de la musique et dictionnaire du conservatoire.
2ème Partie *** Technique instrumentale.
DELAGRAVE - PARIS (1925).
- LEROY (R.) - Traité de la flûte.
Ed. Musicales Transatlantiques - Paris (1966).
- LEIPP (E.)
- (1) La chaîne de communication du message musical.
Cahiers d'Etude de Radio-Télévision - Flammarion, Paris (1960)
 - (2) Les mesures et leur signification en acoustique musicale.
Annales des Télécommunications. T. 19 (1962), p. 190 sequ.
 - (3) Les champs de liberté des instruments de musique.
Bulletin G.A.M. N° 10 - Paris (1965).
 - (4) Méthode d'appréciation des qualités musicales d'un ensemble orgue-salle.
C.R. 5^e ICA - Liège (1965).
 - (5) Acoustique et musique.
Masson ed. Paris (1971) - 250 p.
 - (6) Métrologie et audition.
Revue d'Acoustique - Vol. 9, N° 36 - Paris (1976)
 - (7) Images et traitement d'images.
Bulletin GAM N° 68 - Paris (1973).
 - (8) Peut-on tester l'oreille musicienne ?
Bulletin GAM N° 85 - Paris (1976).
- LORET (V.) - Les Flûtes égyptiennes antiques.
Journal Asiatique N° 13 - Paris (1890).

- LOTTERMOSE (W.) et MEYER (J.) - Orgelakustik in einzeldarstellungen.
Verlag Das Musikinstrument, Frankfurt am Main, (1966) - 175 pages
- LOTTERMOSE (W.) et JENKNER (E.) - Neuzeitliches Abstimmungsverfahren bei Orgeln.
in "Das Musikinstrument". 19. (1970) - p. 1163.
- MAHILLON (V.) (1) - Eléments d'acoustique musicale et instrumentale.
Manufacture générale d'instruments de musique, Bruxelles (1874)
- (2) - Etude sur la doigté de la flûte BOEHM.
Edité par V.C. Mahillon - Bruxelles (1882) - 16 p.
- (3) - Catalogue descriptif et analytique du Musée Instrumental du conservatoire royal de Musique.
4 Tomes - Gand (1893 à 1912)
- (4) - Notes théoriques et pratiques sur la résonance des colonnes d'air dans les tuyaux de la facture instrumentale (1921)
- MANGA (J.) - La musique populaire hongroise et ses instruments.
Ed. Corvina, Budapest (1969)
- MARENHOLZ (Ch.) - Die Orgelregister ... ihre Geschichte und ihr Bau,
Ed. Bärenreiter, Kassel, (1930)
- MARVIN (B.) - Recorders and English Flûtes in European Collections
Galpin Society Journal, T. XXV (1972) - p. 30 à 57.
- MERCER (D.) - Organ pipe voicing adjustments as a guide to theories of the mechanism of the pipe.
Comptes-rendus - 5^e I.C.A. - Liège (1965)
- MERCIER (J.) - Etude de la stabilité des oscillations entretenues dans un tuyau sonore couplé à un tuyau mort.
in "Acoustique Musicale" - Colloque CNRS - PARIS (1958) - p. 231-237.
- MERSENNE (M.) - Harmonia universella,
Cramoisy ed. PARIS (1636) - Réédition CNRS - PARIS 1963.
- MEYER (J.) (1) - "Über Resonanzeigenschaften und Einschwingvorgänge von Labialen Orgelpfeifen.
Thèse - Braunschweig (1960)
- (2) - "Über die Messung der Frequenzskalen von Holzblasinstrumenten.
"Das Musikinstrument" (1961) - Frankfurt/Main - 10
- MEYER-SIAT - L'Orgue Joseph Callinet de Mollau
chez l'Auteur - Strasbourg - (1963) - 56 pages
- MEYLAN (R.) - La Flûte.
Ed. Payot, Lausanne (1974) - 112 pages + 1 disque d'exemples.
- MOECK (H.) - Typen Europäischer Blockflöten in Vorzeit, Geschichte und Volksüberlieferung.
Cello, (1967)
Reproduit dans : Studia Instrumentorum Musicae Popularis I - Musikhistoriska museet Stockholm (1969) - p. 41 à 73.
- MOLES (A.) (1) - La structure physique du signal musical.
Thèse - Bibl. de la Sorbonne - Paris (1952)
- (2) - Théorie de l'information et perception esthétique.
Flammarion - Paris, (1958)

- MÜHLE (Ch.) - Untersuchungen über die Resonanzeigenschaften der Blockflöte.
Thèse - BRAUNSCHWEIG (1966) - 53 pages.
- NAGAI (Y.) et CASTELLENGO (M.) - Déplacement continu d'un trou latéral dans un tuyau à embouchure de flûte.
Comptes-rendus du 7ème I.C.A. - Budapest (1971)
- NEDERVEEN (C.J.)
(1) - Acoustical aspects of woodwind instruments.
Frits Knuf ed. AMSTERDAM (1969)
(2) - Blown, Passive and calculated resonance frequencies of the Flute.
Acustica - vol.28 (1973) - p. 12 à 22.
- NEDERVEEN et VAN WULFFTEN - Resonance frequency of a gaz in a tube with a short closed side tube.
Acustica, vol. 13 n° 2 (1963) - p. 65 à 70.
- PANTOJA (A.) - Metodo para quena.
Ed. Tempo - Buenos Aires (1962)
- PETER (H.) - Die Blockflöte und ihre Spielweise in Vergangenheit und Gegenwart.
Ed. Robert Lienau, Berlin (1953)
- PHILBERT (C.M.) - Causerie sur le grand orgue de Rouen.
Opuscule imprimé par H. GIBERT - Avranches, (1890)
- POWELL (A.) - Nature of the feedback mechanism in some fluid flows producing sound.
Comptes-rendus du 4° I.C.A. - Copenhague (1962)
- PRAETORIUS (M.) - Syntagmatis Musici.
Wolfenbüttel (1618). - T.II de Organographia.
Réédition Bärenreiter Kassel (1968).
- QUANTZ (J.J.) - Versuch einer anweisung die "flöte traversière" zu spielen.
Fac similé de l'édition Breslau (1789). Bärenreiter Kassel (1953)
- On playing the flöte.
Trad. et notes de Edward R. REILLY - Ed. Faber et Faber - Londres (1966)
- Essai d'une méthode pour apprendre à jouer de la flöte traversière.
Fac. similé de l'édit. Franc. de 1752 - Ed. Zurfluh - PARIS (1945).
- RAKOWSKI (A.) - Opening transients in tones of the flöte.
Bulletin de la Société des Amis des Sciences et des Lettres de Poznan.
Série B - XIX livraison (1966) - p. 157 à 161.
- RAKOWSKI et RICHARDSON - Eine Analyse des Intonierungsvorganges bei orgeln.
Gravesaner Blätter - N° XV - XVI (1960) - p. 46 à 54
- RAYLEIGH (J.W.S.) - The theory of sound.
Mac Millan and Co - London - (1894) (2ème Edition)
Réimpression 1929.
- ROCKSTRO (S.S.) - A treatise on the construction, the history and the practice of the flute.
Londres (1890) - Nouvelle Edition par Musica Rara - Londres (1967).

- SACHS (C.) (1) - Real-Lexikon der Musikinstrumente.
2ème Ed. révisée et complétée de l'édition de Berlin (1913)
Ed. DOVER - New-York (1964).
- (2) - History of musical instruments.
W. NORTON - Ed. New-York (1940).
- SAROSI (B.) - Die Ungarische Flöte
Acta Ethnographica - Tome XIV - Fasc. 1-2 - BUDAPEST (1965)
- SAVART (F.) - Mémoire sur la voix humaine.
Annales de chimie Physique - T.30 (1825) - p. 64 à 87
- SAUNDERS (F.A.) - Analysis of the tones of a few Wind instruments.
J.A.S.A. - Vol. 18 N° 2 - p. 395-401 (1946).
-
- SCHAEFFNER (A.) - Origine des instruments de musique.
PARIS (1936).
Réédité par Johnson reprint Corp. - PARIS (1968).
- SECHET (P.) - Reflexions sur "l'essai" de J.J. QUANTZ et la fl. trav. à 1^{er} clé.
in "Essai ..." de QUANTZ - Ed. Zurfluhén - Paris (1975).
- SMITH (R.A.) et MERCER (D.M.A.) - Possible causes of woodwind tone colour
J.A.S.A. 32 (3) - 1974 - p. 347/358.
- STEVENS (S.S.) et DAVIS (H.) - Hearing
Wiley - New-York (1948).
- SUNBERG (J.) et LINDQVIST (D) - Musical octaves and pitch.
J.A.S.A. - Vol.54 - N° 4 (1973) - p. 922-929.
- TAMBA (A.) - La structure musicale du Ng.
Ed. Klincksieck - PARIS (1974) - 145 p.
- TANNER (R.) - Etude expérimentale de divers types de tuyaux sonores bouchés, du point
de vue de la pureté du timbre.
Acustica - Vol. 8 - p.226 (1958).
- TARNOCZY (T.) - Recherches sur le spectre de l'orgue en faisant sonner plusieurs
touches à la fois.
in "Acoustique Musicale" - Colloque MARSEILLE 1958
C.N.R.S. - PARIS (1959)
- TJERLUND (P.), SUNDBERG (J.) - Grundfrequenzmessungen an schwedischen Kernspaltflöten.
et FRANSSON(F.) in Studia Instrumentorum musicae popularis II, éd. Erich Stockmann,
Musikhistoriskamuseet, Stockholm (1972)
- VAN ESBROECK et MONTFORT - Qu'est-ce que jouer juste ?
Ed. Lumière - Bruxelles (1948).
- VIRDUNG (S.) - Musica Getutsch.
Basel (1511)
Fac. simulé Bärenreiter - KASSEL (1970)
- YOUNG (R.) - Standing sound waves in the BOEHM flute measured by the hot wire probe.
J.A.S.A. - vol.7 N° 3 - p. 178-189 - New York (1936).
- sur l'intonation de divers instruments de musique.
in "Acoustique musicale" - Colloque CNRS - PARIS (1959) - p. 171
- ZAMMINER (F.) - Die Musik und die musikalischen Instrumente.
GIESSEN (1855).

