

### 3 - ETUDE EXPERIMENTALE DES TUYAUX A BOUCHE - 1964-1976 ET 1994-2001



Figure 3.1 - A gauche : Joueur de flûte traversière à une clé. France, 1707. A droite : Joueurs de flûtes à bec des Andes

## 1. Introduction

Expert de l'acoustique des instruments à cordes Emile Leipp m'a suggéré d'entreprendre une thèse sur les instruments à embouchure de flûte afin d'élargir notre domaine de recherches. J'avais déjà construit quelques flûtes à bec en bambou (pipeaux) ce qui m'a permis de démarrer rapidement l'expérimentation en l'absence de contacts avec les professionnels. Dans les années 60, la facture instrumentale française de la flûte traversière était en récession, et les facteurs d'orgue restaient plutôt "méfiants" vis à vis des acousticiens. Quand à la flûte à bec, l'heure du renouveau n'était pas encore venue. J'ai pu quelques solistes de la flûte traversière comme René Le Roy, Geneviève Noufflard puis Pierre-Yves Artaud acceptèrent de se prêter à des enregistrements exploratoires, de même que plusieurs joueurs de flûtes "traditionnelles" : galoubet (Marius Fabre), flûte japonaise du Théâtre Nô (Akira Tamba), flûtes obliques de l'Orient méditerranéen (Faouzi Saieb).

Vers 1975 se développe un mouvement d'intérêt pour la flûte résultant de la double conjonction de la pratique renouvelée des instruments traditionnels (festivals musicaux post-68) et de la redécouverte des instruments anciens. Ce sera, sitôt la thèse finie, l'étude de la flûte traversière à une clé (avec Pierre Séchet et François Drouin), et le contact avec de jeunes facteurs (Henri Gohin et Claire Soubeyran).

Le même courant d'intérêt pour les instruments anciens suscite un regain d'intérêt pour les orgues des 17ème et 18ème siècle restés dans leur harmonie d'origine. En 1984, je suis nommée à la Commission supérieure des Orgues et Monuments Historiques d'où émaneront des demandes d'enregistrements d'orgue et des études sur le positionnement des instruments dans l'édifice. [voir Chapitre 4]

Plus récemment, les recherches développées par Benoît Fabre au cours de sa thèse et les discussions avec Abraham Hirschberg m'ont convaincue de reprendre quelques uns des résultats développés dans ma thèse qui n'avaient pas été publiés .

## 2. Thèse : 1964-1976

Le travail qui a donné lieu à la thèse s'est déroulé pendant les 10 premières années de ma présence au laboratoire, en parallèle avec une multitude d'autres thèmes de recherche comme la notation des musiques traditionnelles ou l'étude du style des pianistes (voir publications ), et en particulier, dès 1967, avec le travail intense sur la synthèse de la parole. L'objectif principal était l'étude expérimentale des paramètres de l'embouchure ainsi que des paramètres de la perce (longitudinale et latérale), en rapport direct avec les qualités du son produit.

Deux principes directeurs ont guidé cette recherche.

1/ **L'instrument de musique est un tout fonctionnel** : le réglage du système excitateur prend sens en fonction des caractéristiques du (ou des) tuyau(x) associés, et de la technique de jeu du musicien.

L'expérimentation physique porte donc toujours sur des instruments bien identifiés.

Cg: 43. - CASTELLENGO M., (1977), Rôle des positions relatives lumière-biseau sur le timbre d'une flûte à bec, Comptes rendus du 9e ICA, Madrid.

Cg: 51. - CASTELLENGO M., (1968), Rôle du musicien dans les signaux rayonnés par la flûte traversière, Comptes rendus du 6ème ICA, Tokyo

Cg: 52. - CASTELLENGO M., (1967); Le problème de la justesse des flûtes, 4èmes conférences d'Acoustique, Budapest.

2/ **L'analyse acoustique de la qualité sonore doit intégrer des paramètres relevant autant du domaine temporel que du domaine spectral.** L'utilisation de l'analyse "temps/fréquence" fournie par le sonographe, pratiquée intensément au laboratoire avec E. Leipp, nous a permis d'identifier les contributions de phénomènes physiques largement ignorés de la plupart des chercheurs s'attachant exclusivement à la caractérisation précise du seul contenu harmonique, le plus souvent moyenné en temps!. L'étude des transitoires d'attaque des tuyaux à bouche, présentée dans la thèse, a été reprise récemment et a donné lieu à plusieurs publications.

### 3. Organologie des flûtes

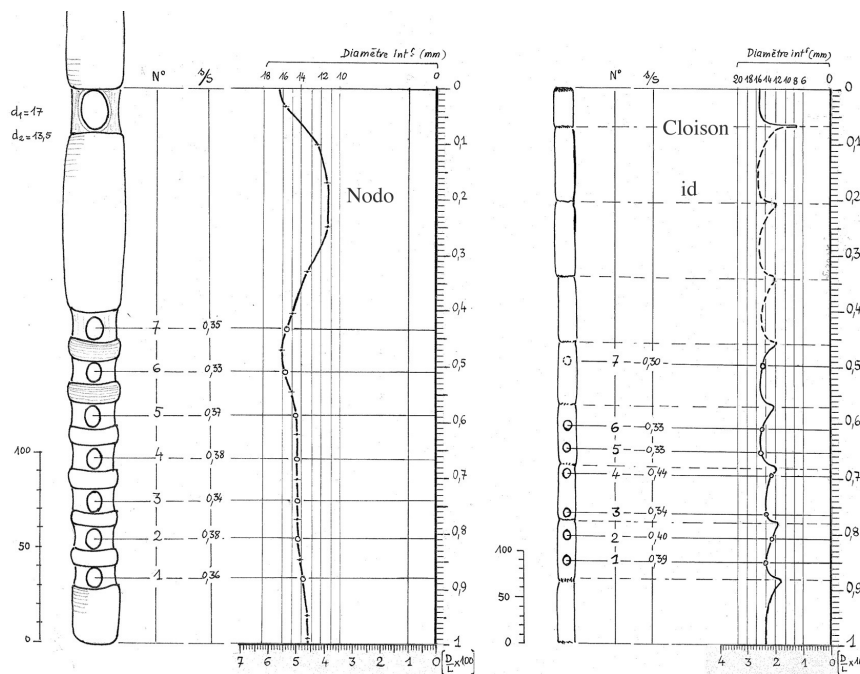
Un instrument de musique est une production humaine dont les spécificités acoustiques prennent sens dans le réseau complexe dans lequel il s'inscrit. Celui-ci inclut :

- 1/ le type d'interprète et ses particularités physiologiques;
- 2/ les circonstances de sa fabrication et de son emploi;
- 3/ le type de musique à laquelle il est destiné, et d'une façon générale,
- 4/ les caractéristiques esthétiques partagées par tous les participants.

C'est ainsi que l'on peut comprendre les "curiosités" ou paradoxes acoustiques de certains instruments qui sont en fait d'ingénieuses trouvailles permettant d'exploiter au mieux les lois physiques en vue de produire la qualité de son et la justesse requises dans un contexte musical donné. En voici deux exemples particulièrement étonnants quand à l'exploitation des particularités de la perce longitudinale.

### 3.1. Flûtes traditionnelles

Le "**nodo**" de la flûte Nô (thèse §3.71), est un tube étroit inséré près du trou d'embouchure de la flûte, qui a pour effet supprimer toute relation d'octave ou de quinte entre les modes propres du tuyau; le **mirliton** des flûtes asiatiques (thèse §3.78) fonctionne comme une source secondaire riche en harmoniques, transformant ainsi la sonorité d'une flûte en celle d'un instrument à anche. Citons aussi le "**bout-mort**" des flûtes chinoises (thèses §3.23) et l'étonnante utilisation des **cloisons internes du roseau** dans les flûtes obliques, Ney iranien et turc (thèses §3.38). Sur ces derniers instruments, la position relative des rétrécissements internes (laissés par l'ouverture des cloisons) et des trous de jeu a été si habilement combinée que la justesse des partiels peut égaler celle d'une flûte Boehm!



**Figure 3.2** - Comparaison des perces de la flûte traversière du théâtre No, à gauche, et du Ney Turco Arabe en roseau, à droite.

Nous avons, à l'issue de l'étude, proposé une typologie acoustique des flûtes (thèses §4.06 à 4.22) et développé quelques études spécifiques comme celle du galoubet, prototype de la flûte à trois trous.

Bul: 10. - La musique du théâtre Nô japonais (coll. A. TAMBA), Bulletin GAM 39 - Paris 1969

Bul: 5. - Le galoubet et le tambourin de provence, Bulletin GAM 23, Paris 1966.

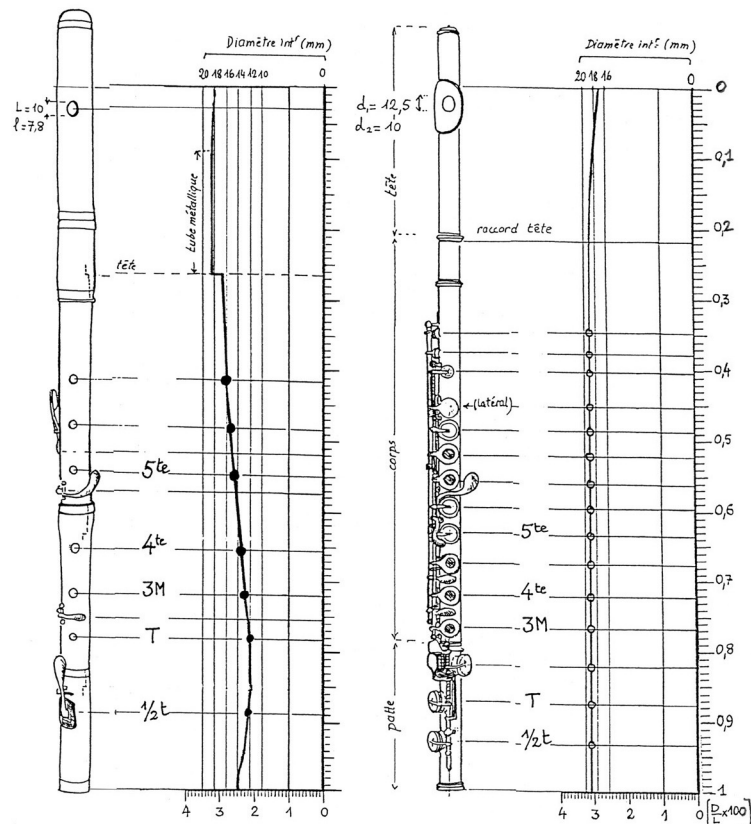
### 3.2. La flûte traversière à une clé dite «baroque»

La flûte traversière à une clé a fait l'objet d'un travail plus approfondi de 1977 à 1980. En collaboration avec un musicien professionnel, Pierre Séchet, et avec François Drouin, jeune facteur, nous avons mis en pratique les résultats

de nos recherches sur la perce des flûtes, en expérimentant sur des instruments de qualité, spécialement construits pour les essais.



**Figure 3.3** - De gauche à droite : 5/ flûte métal système Boehm; 4/ flûte métal à doigté baroque; 3/ Flûte en bois système Boehm; 2/ flûte à cinq petites clés; 1/flûte «baroque» à une clé;



**Figure 3.3** - Comparaison des perces de la flûte à une clé (gauche) et de la flûte système Boehm (droite).

Parallèlement à ce travail dont l'objectif était de mettre au point un modèle de flûte traversière à une clé, nous avons, pendant deux années, mesuré et enregistré systématiquement tous les instruments anciens disponibles, tant au Musée du Conservatoire de Paris que dans les collections particulières. Les dossiers, en dépôt au LAM, comprennent

### Son 8

Flûte traversière baroque à 4 petites clés avec les doigts de fourche; Gamme chromatique Ré3-Ré4 ; jeu LF; MC Lam 1998.

### Son 9

Flûte traversière système Boehm (Buffet-Crampon); Gamme chromatique Ré3-Ré4; jeu LF. MC Lam 1998.

### Son 10

Incidence de l'interprète sur la sonorité d'une flûte traversière. Une phrase musicale est jouée successivement par LF puis par BF : même instrument, mêmes conditions d'enregistrement. MC, 1998.

le relevé exhaustif des mensurations internes et externes; des photos techniques; le relevé des partiels du tuyau pour les 6 trous fondamentaux (ouverts successivement); le champ de liberté acoustique de l'instrument pour tous les doigts en usage; un enregistrement de quelques extraits musicaux joués par P. Séchet. L'essentiel de ces relevés a été numérisé au Musée de la musique, en 2000, dans le cadre d'un mémoire de maîtrise. Les résultats de nos recherches ont fait l'objet d'une séance au GAM

Bul: 19. - La flûte traversière à une clef (Coll. F. DROUIN , P. SECHET), Bulletin GAM 97, Paris 1978.

Plusieurs modèles de flûtes à une clé ont été mis au point dès 1979 par F. Drouin<sup>7</sup>. Quelques jeunes facteurs qui étaient en relation avec nous (H. Gohin, C. Soubeyran, Ph. A. Dupré) ont adopté notre méthode de relevé acoustique et l'ont appliquée avec profit pour la "re-crédation" d'instruments anciens.

## 3.3. De la flûte traversière baroque à la flûte Boehm

Les connaissances acquises au cours de ces travaux nous ont permis de mieux appréhender l'histoire complexe des transformations de la facture des flûtes depuis le 17<sup>ème</sup> siècle jusqu'à aujourd'hui.

Au: 26. - CASTELLENGO M., (1982), Données acoustiques sur l'évolution des instruments à trous latéraux entre 1750 et 1800, Catalogue de l'exposition "instruments de musique entre 1750-1800", Saintes,.

La comparaison sonore de flûtes traversières de différentes époques se heurte à une difficulté majeure, du fait que le flûtiste contrôle en grande partie la production du son, et réalise donc sur l'instrument le «son» qu'il a en tête. Si les changements sonores dus à la perce, et en particulier les doigts de fourche sont objectivement audibles (Ex Son 8 et 9), ceux dus au musicien n'en sont pas moins considérables (Ex 10). Lors du colloque «Acoustique et instruments anciens» de 1999 nous avons aussi pu montrer une fois de plus que l'incidence du matériau (métal ou bois) sur ce type d'instrument était quantité négligeable.

Cg: 9. - CASTELLENGO M., (1999), Métamorphoses de la flûte traversière au 19<sup>ème</sup> siècle : Esthétique musicale, acoustique et facture. Actes du colloque "Acoustique et instruments anciens", édité par la SFA; pp.85-100 (avec Ex. sonores)

Bul: 8. - La flûte traversière, Bulletin GAM 35 - Paris 1968.

---

7. On peut les entendre dans l'enregistrement des sonates pour deux flûtes traversières sans basse de W.F. Bach, enregistrées par P. Séchet et P. Evison en 1980 - (CD Stil-1908 S 80)

### 3.4. Flûte à bec et Flûte traversière contemporaine.

Comme c'est souvent le cas, les contacts avec les facteurs étaient extrêmement difficiles pendant la thèse, et rares étaient les musiciens qui pouvaient se prêter aux expériences. La situation s'est inversée dès 1978.

Au: 29. - CASTELLENGO M., (1978), La flûte à bec, L'audiophile 5, Paris.

Sollicitée par de nombreux musiciens redécouvrant la flûte à bec, par de jeunes facteurs se lançant dans la facture de l'instrument, nous avons communiqué un grand nombre d'informations au cours de séminaires, (GAM 1977), dans le cadre de nombreuses conférences données au sein des formations de musiciens intervenants, et dans les stages de musique alors en vogue croissante [Voir liste des conférences, p.]. Le compte rendu de la réunion du GAM sur la flûte à bec, rédigé pour partie, n'a pas été terminé. La thèse avait duré trop longtemps et nous avions un fort désir d'aborder d'autres sujets.

Mais deux musiciens, P.Y.Artaud, flûtiste pionnier des nouvelles techniques de jeu, et G. Geay, compositeur, nous sollicitent pour analyser les nouvelles productions sonores à la flûte traversière. Le point sera fait lors d'un séminaire : "La flûte traversière aujourd'hui", avec P.Y.Artaud, 1982, et fournira en partie le contenu d'un article.

Au: 8. - CASTELLENGO M., FABRE B., (1994), The contemporary transverse flute and the shakuhachi: convergences. An acoustic analysis of performance techniques, Contemporary Music Review, 8-2, p217-237

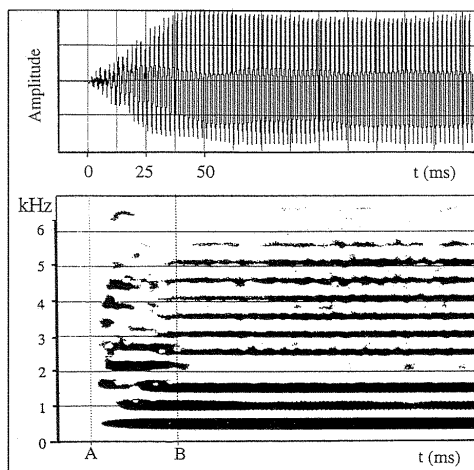
Les premiers contacts avec l'Ircam et avec la synthèse vont nous entraîner vers la musique contemporaine et les problèmes acoustiques et perceptifs posés par les nouveaux modes de jeu. (cf chapitre 6, les multiphoniques).

## 4. Transitoire d'attaque des tuyaux à bouche

### 4.1. Travaux de la thèse : 1968-1974

#### Son 11

Tuyau d'orgue. a) transitoire d'attaque Normal; b) transitoire étiré x2; c) étiré x4. (Séquence présentée 2 fois). MC, labo 1999



**Figure 3.4** - Analyse du transitoire d'attaque d'un tuyau d'orgue. En haut: forme d'onde ; en bas : analyse spectrotemporelle (sonagramme).

La représentation sonographique<sup>8</sup>, aujourd'hui aisée à obtenir grâce aux nombreux logiciels disponibles sur micro-ordinateur, est restée longtemps liée à un appareillage analogique coûteux. De nombreux collègues la considéraient d'ailleurs avec réserve, en pointant le fait que nous ne pouvions pas, à cette époque, en extraire des mesures précises. Au laboratoire nous en faisons grand usage car la représentation fournie était en bon accord avec la perception. En effet, l'oreille est prioritairement sensible aux fines variations temporelles d'amplitude et de fréquence. Les techniques d'analyse en usage dans les laboratoires consistaient essentiellement dans l'analyse spectrale moyennée d'un son mis en boucle (donc ignorant les variations temporelles) ou dans l'observation de la forme d'onde fournie par l'oscilloscope analogique. Voir Figure 3.4 Cette dernière, très précise sur le plan temporel, ne permettait qu'une estimation très grossière du spectre, et tendait à privilégier l'importance des basses fréquences généralement plus intenses, mais peu efficaces à l'oreille<sup>9</sup>.

Dans l'optique qui nous importe : comprendre la réaction d'un auditeur à l'écoute des sons, la représentation spectro-temporelle du sonographe (aujourd'hui numérique donc précise!) reste à notre sens, le premier type

d'analyse à mettre en oeuvre dans la phase exploratoire des phénomènes.

Le contenu acoustique du transitoire est complexe et le phénomène est souvent si bref qu'il est difficile de l'analyser à l'oreille. On peut écouter l'exemple *Son 11* [Tuyau d'orgue. a) transitoire d'attaque Normal; b) transitoire étiré x2; c) étiré x4. (Séquence présentée 2 fois). MC, labo 1999] qui propose un étirement temporel.

8. Bien que le principe d'analyse de l'appareil utilisé à l'époque (hétérodyne glissant) soit différent de ceux pratiqués dans les algorithmes des différents programmes, la représentation visuelle est tout à fait analogue.

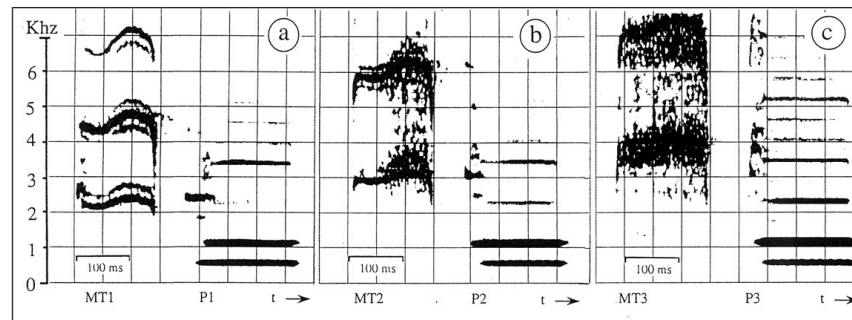
9. C'est, aujourd'hui encore, sous forme numérique, les principales analyses utilisées dans la recherche acoustique.



Nous avons montré, à l'aide d'expériences simples isolant le système exciteur buccal du tuyau proprement dit, que le contenu initial des transitoires dépendait du son de biseau produit par la bouche seule. Les phénomènes étaient déjà décrits dans les ouvrages de Bouasse (1925), mais n'avaient pas fait l'objet d'analyse acoustique. Les résultats ont été présentés au séminaire du GAM N°42 et lors d'une communication au congrès ICA de Londres.

Bul: 12. - Les paramètres sensibles d'un tuyau d'orgue à bouche, Bulletin GAM 42 - Paris 1969

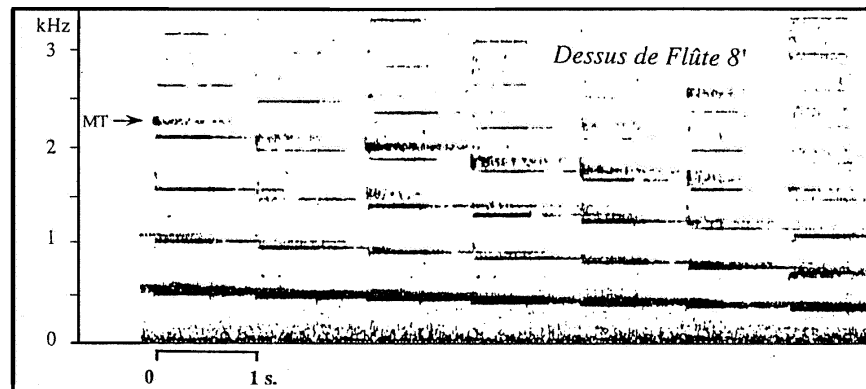
Cg: 44. - CASTELLENGO M., (1974), Spectrographie des transitoires d'attaque des tuyaux à embouchure de flûte, Comptes rendus du 8è ICA - Londres.



**Figure 3.5** - Variation du transitoire d'attaque avec la pression. On a analysé successivement, le son de biseau isolé (MT) et le son du tuyau entier (P.) Voir Ex *Son 12*

### Son 12

Variation du transitoire d'un tuyau d'orgue avec le changement de pression. On entend successivement le son de biseau seul, puis le tuyau pour la même pression. cf Figure. MC, labo 1969.



**Figure 3.6** Analyse d'une gamme chromatique descendante montrant l'importance des sons de bouche (MT), au dessus de l'harmonique 4. Orgue de Poitiers.

## 4.2. Reprise des recherches : 1994-2001

L'intérêt suscité par les nombreuses publications sur l'acoustique des tuyaux à bouche (principalement N.Fletcher et W.Nolle), la thèse de B. Fabre et celle de M.P. Verge, ont été les déclencheurs d'une reprise de cette recherche. De fait, alors que la théorie des tuyaux avait considérablement progressé, les phénomènes se produisant pendant le transitoire d'attaque restaient mal connus, voire mal interprétés. Les travaux, repris dans le cadre d'un DEA, sont présentés à deux congrès.

Cg: 24. - KAMP Ph., CASTELLENGO M., STEPANEK J., (1995) Critères acoustiques caractérisant les transitoires d'attaque de deux jeux d'orgue à bouche et analyse de l'évolution de ces critères sur l'ensemble de la tessiture, International Symposium on Musical Acoustics (Dourdan), actes édités par la SFA, pp. 61-67

Cg: 23. - CASTELLENGO M., (1996).The role of mouth-tones in the constitution of attack transients of flute and organ pipe, Forum acusticum (Anvers), Acustica/ Acta Acustica 82 Suppl.1, S216

### Son 13

Sons de bouche du transitoire d'attaque d'un bourdon. Orgue de St Maximin, CD L'empreinte Digitale, Début de la Muzète de Dandrieu.

Dans les instruments où la sonorité est réglée à la construction comme la flûte à bec et l'orgue, le production d'un son de bouche transitoire audible est recherchée par le facteur. Ecouter l'exemple du Son **13** dans lequel les sons de bouche s'entendent très nettement à la mélodie supérieure (bourdon). Très sensible aux rapides variations de la pression initiale, ce son de bouche joue un rôle important dans la netteté et dans la qualité du transitoire d'attaque des flûtes à bec et de l'orgue. A la flûte à bec, le musicien contrôle le contenu du transitoire en utilisant différents coups de langue. A l'orgue, la présence de sons de bouche confère une variabilité intéressante à des tuyaux de spectre fixe mais les variations de pression ne sont pas directement contrôlables, sauf sur de petits instruments, lorsqu'on actionne directement la soupape de gravure, et qu'un seul jeu est tiré. L'exemple **14** fait entendre les variations du transitoire d'attaque d'une note d'un jeu de bourdon lorsqu'on change la vitesse d'enfoncement de la touche du clavier. Le plus souvent les oscillations de pression, très complexes, ne sont pas reproductibles. Les recherches ont été présentées à Berlin en 1999 et publiées dans Acta Acustica.

### Son 14

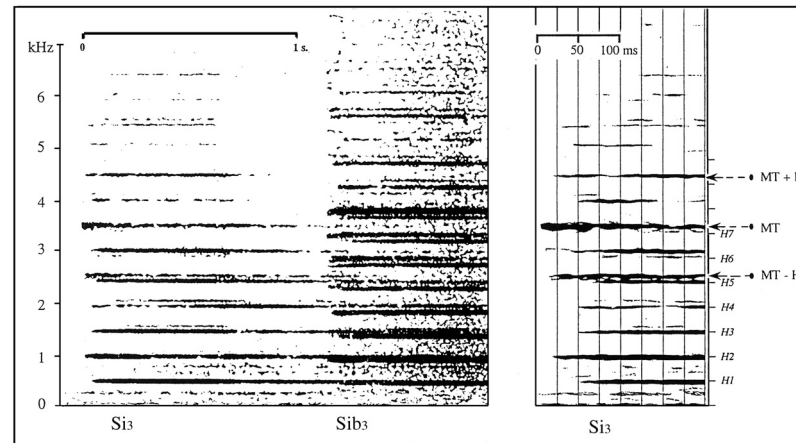
Orgue. Variation du son de bouche au transitoire, en fonction de la rapidité de l'attaque. Note du bourdon jouée en enfonçant la touche franchement puis mollement - Orgue Koenig, 1971.

P2. - CASTELLENGO M., (1999), Analysis of initial transients in flute like instruments. Acta Acustica, 85, p.387-400

Les principaux résultats sont les suivants :

- Les sons de biseau, produits par le système excitateur déconnecté du tuyau ont un spectre complexe dont le contenu varie directement avec celle de la vitesse de sortie de l'air. Plusieurs régimes d'oscillation peuvent se produire, expliquant les sauts (ascendant ou descendant) de fréquence que l'on peut observer.
- Dans la partie initiale du transitoire d'un instrument complet, avant l'établissement de l'onde interne contrôlée par le tuyau, les sons de biseau qui apparaissent se stabilisent, au cours de la montée de la pression, sur les modes propres inharmoniques du tuyau.

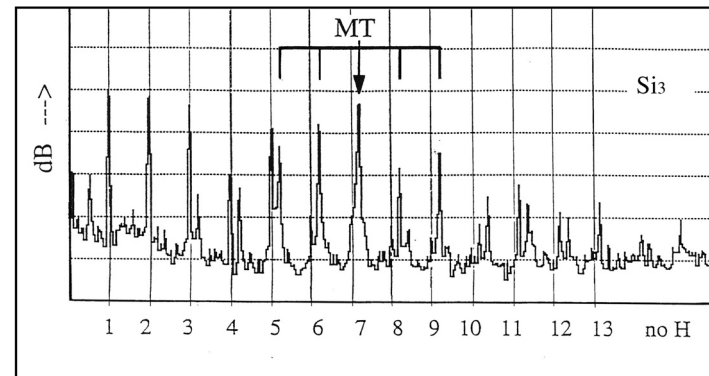
- Cette constatation peut être clairement établie en comparant successivement, lors d'une montée en pression identique, les sons produits par le système lame-d'air biseau de la bouche et ceux du transitoire de l'instrument complet, sur une analyse de type sonagramme.
- Les sons de bouche dus au son de biseau ne disparaissent pas instantanément. Leur coexistence avec l'arrivée du fondamental produit des phénomènes non linéaires complexes (sons additionnels et différentiels), habituellement brefs, mais qui persistent quelquefois sur toute la durée du son.



**Figure 3.7** Analyse d'un tuyau du jeu de Viola 4' de l'Orgue Italien de Tende. Le son de biseau, stabilisé sur la fréquence du mode 7 du tuyau, persiste avec le son du régime fondamental (mode 1). L'analyse des composantes inharmoniques du spectre est montrée à droite.

- La facture d'orgue a exploité cet effet. L'article analyse le comportement d'un jeu d'orgue utilisé dans la facture italienne du XIXème siècle (Viola 4'; cf Ex Son 15). Le son exceptionnel de ce jeu est le produit de l'entretien simultané d'un régime de son de biseau excitant un mode propre inharmonique du tuyau (N° 6 ou 7), et du régime fondamental habituel (N°1). Voir figures 3.7 et 3.8 et les exemples sonores 16 et 17. Le résultat, d'une grande complexité sonore, trouve ainsi explication.

L'article a été re-publié dans la revue professionnelle des facteurs d'orgue (en français, Anglais et Allemand).



**Figure 3.8** - Spectre moyenné du premier son de viola 4', Si3, montrant d'une part le spectre harmonique du mode 1 et d'autre part les composantes inharmoniques dues au son de biseau.

### Son 15

Sons de bouches inharmoniques du Jeu de Viola4'-Orgue de La Brugue ; début de « Casta diva » de Bellini, CD Adda .

### Son 16

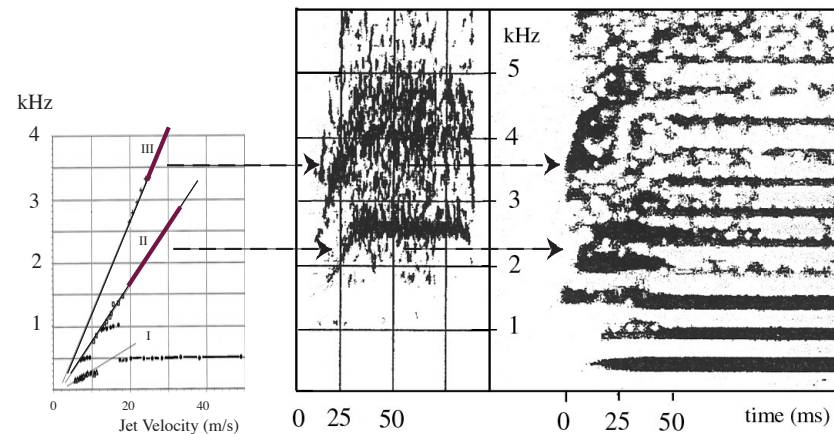
Sons de bouche inharmoniques; Gamme chromatique descendante, détachée, sur le jeu de viola 4 : MC; Mission Tende 1989.

### Son 17

Viola 4' ; Analyse séparant le son harmonique de la partie inharmonique du spectre. On entend successivement le son du tuyau ; la partie périodique ; la partie inharmonique ; le son du tuyau reconstitué. (la partie « bruit » a été laissée de côté). V.Rioux 1998.

Au: 1. - CASTELLENGO M., (2001), Analyse acoustique du transitoire d'attaque des tuyaux à bouche. Publication trilingue (Français, Allemand, Anglais) de l'article paru dans Acta Acustica; ISO Journal (International Society of Organbuilders); N°s 10, 11 et 12.

Répondant à l'invitation d'une conférence à l'ICA de Rome nous avons effectué des mesures comparées de l'intensité du son de biseau, du son de bouche et du son du tuyau pour la même fréquence de fonctionnement. En conclusion, B. Fabre signale que le comportement du tuyau en son de bouche (piaulement des tuyaux d'orgue, whistle tone de la flûte traversière) devrait être pris en compte dans les modèle de fonctionnement des instruments à embouchure de flûte.



**Figure 3.9** - A gauche : Courbes buccales . Les flèches indiquent les 2 zones de fréquences (autour de 2000Hz et autour de 3500 Hz) des courbes buccales II et III actives pendant le son de bouche du transitoire (vitesse du jet =20m/s). A droite : Analyse acoustique du son de bouche seule (gauche) et son du tuyau complet. Les deux transitoires (25 premières millisecondes) ont un contenu spectral dont l'évolution est très semblable et peut être mis en rapport avec les courbes buccales de la bouche isolée.

Cg: 2. - FABRE B., CASTELLENGO M., (2001); Experiments on mouth-tones during transients and steady-state oscillations in a flue organ pipe. 17th ICA, Roma. [Key-note lecture]

La "plongée" rétrospective dans les recherches effectuées aux temps anciens de la thèse (1969-1976) pour publier ces recherches en 1999 et 2001 fut parfois difficile à mener, mais, en contrepartie, de nombreuses questions ont surgi sous une forme nouvelle. Cette recherche a été reprise en 2004 (voir Présentation des recherche (2) 2002-2007)