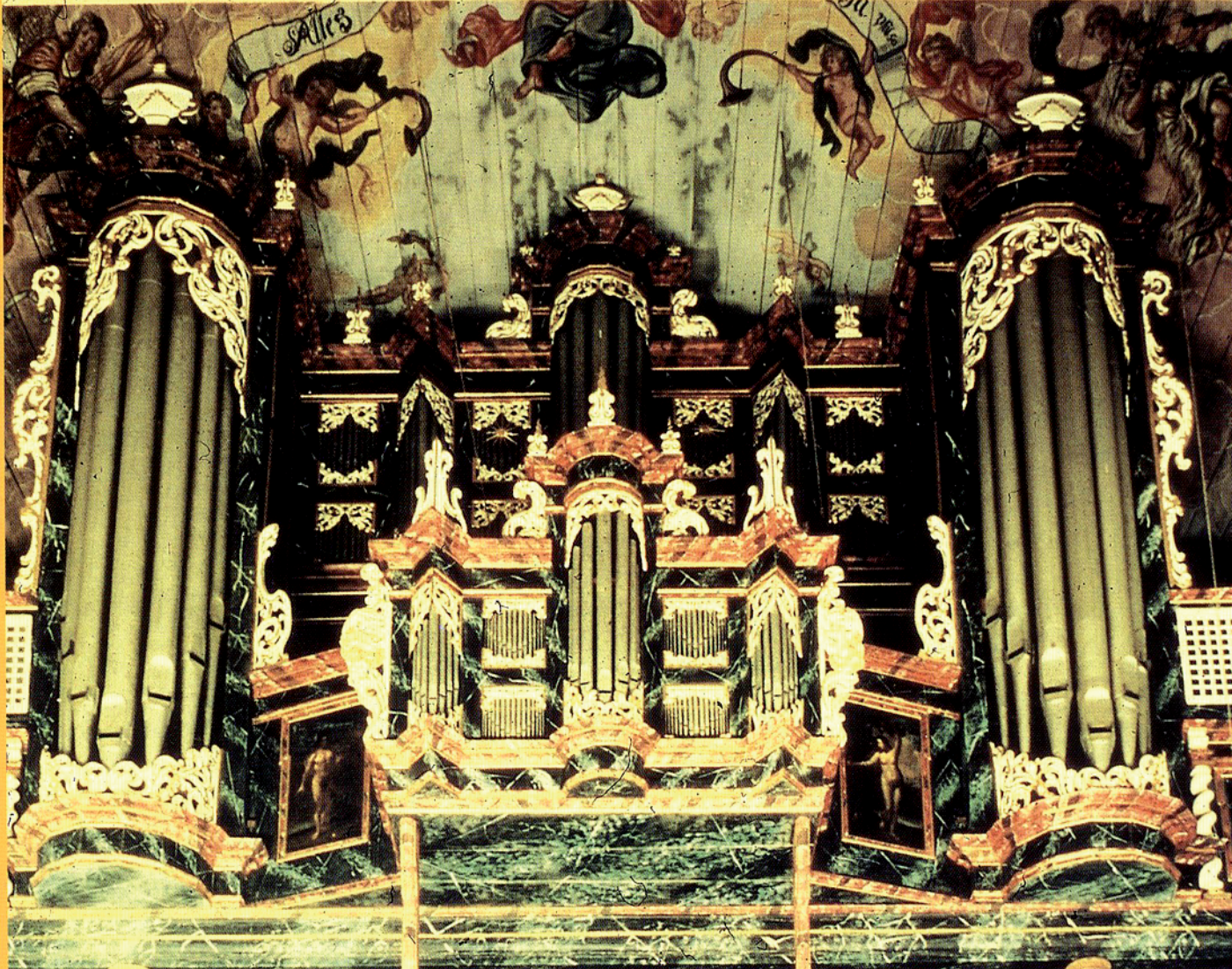


# ISO Journal

The Magazine of the International Society of Organbuilders



■ Airbus-menace hovers over  
Schnitger Organ

■ *Zur Orgel-Philosophie des Hauses*  
*Johannes Rohlf*

■ Analyse acoustique du transitoire des  
tuyaux à bouche

# Analyse acoustique du transitoire d'attaque des tuyaux à bouche

## Sons de bouche et sons de biseau

Michèle Castellengo

**Akustische Analyse von Einschwingvorgängen bei flötenähnlichen Instrumenten:  
Mundtöne und Schneidentöne**

### Inhaltsübersicht

Zeit/Frequenz-Analysen von Klängen, welche bei den Einschwingvorgängen von flötenähnlichen Instrumenten (Blockflöten und Orgelpfeifen) entstehen, zeigen, dass dem harmonischen Obertonaufbau des stabilen Klangzustandes eine Reihe von akustischen Phänomenen vorausgehen – Rauschen und unharmonische Töne –, welche für die wahrgenommene Qualität des Einschwingvorganges sehr wichtig sind. In der vorliegenden Arbeit werden die Einschwingvorgänge bei verschiedenen Orgelpfeifen und Blockflöten, welche bei einem kompletten Lippenpfeifeninstrument entstehen (Mundtöne) mit denjenigen verglichen, welche bei demselben Mundstück entstehen, wenn es von der Pfeife getrennt wurde (Schneidentöne). Mundtöne eines kompletten Instrumentes werden genauso wie Schneidentöne hauptsächlich von Parametern des Pfeifenmundes beeinflusst: der Geschwindigkeit des Luftbandes am Kernspalt und des Abstandes zwischen Kernspalt und Labium; deshalb entsprechen diese der Eigenschwingung des Pfeifenmundes. Während des Druckaufbaus und bei Übereinstimmung der Frequenzen, können sich die Mundtöne auf einer der Eigenschwingungen der Pfeife stabilisieren, wobei ein unharmonischer Vorläuferton entsteht, der von vielen Autoren beobachtet wurde. Im allgemeinen verschwinden Mundtöne, welche vom "Mundverhalten" des Luftbandes abhängig sind, sobald der stabile Ton aufgebaut ist. Jedoch wird eine paradoxe Funktionsweise, bei welcher Mundtöne und Obertöne der ersten Eigenschwingung koexistieren, gesucht, wenn man ein bestimmtes Orgelregister intoniert: die Viola 4' er italienischen Orgel. Die musikalische Relevanz von Mundtönen wird sowohl für Blockflöten als auch für spezifische Orgelregister diskutiert.

### 1 Einführung

Bei der vorliegenden Arbeit geht es um die spektrografische Analyse von Einschwingvorgängen von flötenähnlichen Instrumenten: Blockflöten, Flöten, offenen und gedeckten Pfeifen und jeglichen Instrumenten mit einem Flötenmundstück.

**Acoustical analysis of initial transients in flute like instruments:  
Mouth sounds and edge tones**

### Abstract

Time frequency analysis of sounds produced during the initial transients of flute like instruments, (recorders and organ pipes) show that the build-up of the different harmonics of the steady state sounds is preceded by a group of acoustical phenomena – noises, inharmonic tones – which are very important for the perceived quality of the transients. In this paper, initial transients produced by a complete flue pipe instrument (mouth tones) are compared with those produced by the same mouthpiece disconnected from the pipe (edge tones) on several instruments: organ pipes and recorders. Mouth tones from the initial transients of a complete instrument are, just like edge tones, mainly controlled by the mouth parameters: speed of jet at flue exit; and distance between flue exit and labium; they therefore correspond to self-oscillation of the mouth. During pressure build-up and when frequencies coincide, mouth tones can stabilise on one resonant mode of the pipe, creating an inharmonic forerunner which has been observed by many authors. In general, mouth tones, which are due to "mouth behaviour" of the jet, disappear as soon as the regular steady state is established. However, a paradoxical functioning where mouth tones and harmonics of the first mode are coexisting is sought for when voicing a specific organ stop: the viola 4' of the Italian organ. The musical relevance of mouth tones is discussed for the recorder as well as when voicing specific organ stops.

### 1 Introduction

This work concerns the spectrographic analysis of initial transients of flue like instruments: recorders, flutes, open and stopped pipes, or any instrument with a flute mouth piece.

#### 1.1 Acoustical analysis of transients

Due to their very short duration and their complexity, initial transients have created difficulties for experimenters. In 1939, Jones published the first analysis

### Résumé

L'analyse acoustique de l'évolution temporelle du spectre des sons produits lors du transitoire d'attaque de tuyaux à embouchure de flûte (flûte à bec et tuyau d'orgue) montre que l'établissement des différents harmoniques du son stationnaire est précédé par un ensemble de phénomènes acoustiques : bruits, sons inharmoniques, d'une grande importance pour la qualité perçue du transitoire. On a effectué la comparaison systématique des sons initiaux produits par le tuyau à bouche complet (sons de bouche) avec ceux que produit la même embouchure déconnectée du tuyau (sons de biseau) en utilisant plusieurs instruments : tuyaux d'orgue et flûtes à bec. On en conclut que les sons de bouche du transitoire d'attaque d'un instrument complet sont, comme les sons de biseau, contrôlés en premier lieu par les paramètres de l'embouchure : vitesse du jet à la lumière et distance lumière-biseau, et correspondent donc à un comportement oscillatoire "autonome" de l'embouchure. On montre que dans certaines conditions (pente de la montée en pression, coïncidences de fréquences) le son de bouche peut se stabiliser sur un des modes de résonance passive du tuyau en produisant un "précurseur" inharmonique signalé par de nombreux auteurs. En général, les sons de bouche dus au comportement "buccal" du jet disparaissent dès l'établissement du régime "normal" entretenu. On montre qu'un fonctionnement de type paradoxal, faisant coexister les sons buccaux et les harmoniques du mode 1, est recherché dans l'harmonisation d'un jeu d'orgue : la viola 4' de l'orgue italien. L'importance musicale des sons de bouche est examinée tant dans le jeu de la flûte à bec que dans l'harmonisation de quelques jeux d'orgue.

### 1 Introduction

Cette étude concerne l'analyse spectrographique des phénomènes se produisant pendant le transitoire d'attaque des tuyaux à embouchure de flûte : flûte à bec, flûte traversière, tuyaux d'orgue ouverts ou bouchés et de façon générale tout instrument muni d'une embouchure de flûte.

### 1.1 Akustische Analyse von Einschwingvorgängen

Wegen ihrer sehr kurzen Dauer und ihrer Komplexität bereiten Einschwingvorgänge den Experimentatoren Schwierigkeiten. 1939 veröffentlichte Jones die ersten Analysen von Einschwingvorgängen von Orgelpfeifen [1], welche Trendelenburg [2] gewonnen hatte. Dabei wurde ein neues System von Oktavbandfiltern genutzt, welche nacheinander eingeschaltet werden konnten; die erste Bandbreite reichte von 37,5 bis 75 Hz, und die letzte von 4,800 bis 9,600 Hz. Das synchronisierte Outputsignal, welches an einem kathodischen Oszillografen dargestellt wurde, konnte auf einem fotografischen Film aufgenommen werden, wobei eine speziell gestaltete Filmkamera genutzt wurde. Das Sichtbarmachen der wellenförmigen Schwingungen, welche von realen Orgelpfeifen ausgehen, machte es möglich, die Abfolge des Auftretens der verschiedenen Obertöne und die Art des Klangaufbaus bei den unterschiedlichen Pfeifentypen darzustellen. Jones beschreibt auch einen spezifischen Einschwingvorgang, auf welchen wir uns unter anderem konzentrieren wollen: als er den Klang einer gedeckten Pfeife mit der Grundfrequenz von 240 Hz (*Lieblich Gedackt*) analysierte, sah er zu Beginn der Tonentstehung eine hochfrequente Vibration in der Oktave bei 1200-2400 Hz, welche sobald verschwand, als der Fundamentton aufgebaut war. Dieser "Vorläuferton" hat gemäß Jones' eigener Formulierung eine Frequenz, welche ungefähr  $5\frac{1}{2}$  mal der Frequenz des Grundtones entspricht. Er gehört nicht zur Reihe der harmonischen Obertöne der Pfeife.

Diese wichtige Beobachtung leitet geradewegs zu folgender grundsätzlicher Frage: "Welches ist die Natur des Einschwingvorganges einer Labialpfeife?" Eine Pfeife, welche gemäß der Erfahrung von Orgel- oder Blockflötenbauern gut spricht, bringt sehr oft hochfrequente Geräusche quasi gleichzeitig mit dem Klang des Grundtones hervor. Dieses Phänomen, welches von sehr schnellen Einschwingvorgängen hervorgerufen wird, ist im allgemeinen zu kurzlebig, damit es vom Ohr richtig analysiert werden könnte. Doch es konnte der Aufmerksamkeit von Akustikern nicht entgehen, welche verschiedene beschreibende Worte geprägt haben, um es zu charakterisieren, so zum Beispiel "chiff", "burst", "ping" or "spitz".

Jedoch konzentrierten sich die Forscher

of organ pipe transients [1], obtained by Trendelenburg [2] using a new system of octave band filters which could be successively switched on, the first band ranging from 37,5 to 75 Hz, the last from 4800 to 9600 Hz. The synchronised output signal displayed on a cathodic oscillograph could be recorded on a photographic film using a specially designed moving film camera. Displaying the waveforms from real pipes made it possible to describe the order in which the different harmonics were coming in and the shape under which the sound builds up for different type of pipes. Jones describes as well a special transient which we are going to focus on: analysing the sound from a stopped pipe (*Lieblich Gedackt*) with fundamental frequency 240 Hz, he saw, at the beginning of the tone, a high frequency vibration located within the octave 1200 - 2400 Hz, which disappeared as soon as the fundamental started building up. This "forerunner", according to Jones own wording, has a frequency which is about five and a half time the frequency of the fundamental. It does not belong to the harmonic series of the pipe.

This remarkable observation leads straight off to the following fundamental question: what is the nature of the initial transient of a mouth pipe? A pipe that speaks well, according to the common experience of organ or recorder builders, very often produces high pitch noises quasi-simultaneously with the sound of the main pipe mode. This phenomenon, that creates very quick initial transients, is generally too short for the ear to analyse it really, but did not escape the attention of acousticians who have coined several evocative words to describe it, such as "chiff", "burst", "ping" or "spitz".

However, with the development of new techniques derived from Fourier analysis, researchers [3, 4] focussed on two types of parameters: the order in which each harmonic builds up and the corresponding amplitude rise times, characterising transients and their durations. In 1972, based on the analysis of 200 organs pipes, Keeler [5] characterised the mean transient time for each family of organ stops: 25 to 30 periods for flutes, 50 periods for the diapason family and more than 40 periods for the string family. The author neither men-

### 1.1 Analyse acoustique du transitoire

En raison même de leur brièveté et de leur complexité, les transitoires d'attaque ont longtemps posé de difficiles problèmes aux expérimentateurs qui ont tenté d'en faire l'analyse acoustique. En 1939 Jones publie les premières analyses de transitoires de tuyaux d'orgue [1], obtenues par Trendelenburg [2] à l'aide d'un nouveau système de filtres en bande d'octaves commutables successivement depuis la bande 37,5-75 Hz jusqu'à la bande 4800-9600 Hz. Les signaux de sortie synchronisés s'inscrivaient sur l'écran d'un oscillographe cathodique et pouvaient être enregistrés sur film photographique au moyen d'une caméra à défilement continu. L'étude des formes d'ondes de tuyaux réels permit ainsi de décrire principalement l'ordre d'arrivée et la forme d'établissement de l'amplitude des premières composantes, pour diverses sortes de tuyaux. Mais Jones décrit aussi un transitoire particulier qui va retenir notre attention. L'analyse du son d'un tuyau bouché (*Lieblich Gedackt*) de fréquence fondamentale 240Hz, montre, au début du son, une vibration de haute fréquence située dans l'octave 1200-2400Hz qui disparaît au moment où s'établit le fondamental. Ce "précurseur" (*forerunner*) selon le terme de Jones, a pour fréquence environ 5 fois et demie la fréquence du fondamental: il est étranger à la série harmonique du tuyau.

Cette remarquable observation pose d'emblée la question de la nature du transitoire d'attaque d'un tuyau à bouche. En effet, un tuyau "qui parle bien" selon l'expérience habituelle des facteurs d'orgue et de flûte à bec, produit le plus souvent un bruit aigu quasi simultané avec le son du mode principal du tuyau, ce qui donne une grande promptitude à l'attaque. Le phénomène est généralement trop bref pour que l'oreille puisse véritablement l'analyser mais il n'échappe pas à l'attention des acousticiens qui emploient divers termes évocateurs pour le désigner comme par exemple "chiff", "burst", "ping" ou "spitz".

Toutefois avec le développement de nouvelles techniques d'analyse issues de l'analyse de Fourier l'effort des chercheurs [3, 4] va se porter principalement sur l'étude de la durée du transitoire et sur sa caractérisation par deux paramètres principaux, l'ordre d'arrivée et l'éta-

mit der Entwicklung von neuen Techniken, welche von der Fourier-Analyse abgeleitet wurden [3,4], auf zwei Typen von Parametern: die Reihenfolge, in welcher die Obertöne aufgebaut werden und die entsprechenden Entstehungszeiten der Amplitude, welche die Einschwingvorgänge und ihre Dauer charakterisieren. 1972 beschrieb Keeler [5] die charakteristische Zeit für den Einschwingvorgang für jede Familie von Orgelregistern auf der Basis der Analyse von 200 Orgelpfeifen: 25-30 Schwingungsperioden für Flöten, 50 für die Prinzipale und mehr als 40 Schwingungsperioden für die Streicher. Der Autor erwähnte weder die Herkunft der analysierten Töne noch die Bedingungen, unter welchen sie aufgenommen wurden.

Aktueller ist die Analyse von Angster und Miklos [6] über die Modifikationen der Einschwingvorgänge als eine Funktion der Arbeit der Intonateure. Praktisch beschäftigen sich die Intonateure hauptsächlich mit den Parametern des Pfeifenmundes. Die Autoren nahmen an, dass die Schneidentöne eine Hauptrolle beim Klangaufbau von Labialpfeifen spielen und dass es eine der Zielstellungen des Intonateurs ist, die niedrigste Komponente des Schneidentones beim Grundton der Pfeife zu erzeugen. Jedoch zeigt die akustische Analyse von Einschwingvorgängen bei Orgelpfeifen, welche später in verschiedenen Veröffentlichungen präsentiert wurde [7, 8, 9], nur die Entwicklung der Amplitude der Obertöne. Es werden weder die Geräusche noch unharmonische Obertöne erwähnt, ungeachtet ihrer Beziehung zu den Veränderungen der Schneidentöne.

### 1.2 Experimente und Modelle für das Verhalten des Luftbandes während des Einschwingvorganges

In den letzten zwanzig Jahren beschäftigten sich viele theoretische Veröffentlichungen mit der Klangentstehung in flötenähnlichen Instrumenten. Es wurden sogar einige Modelle stufenweise dahingehend verfeinert, dass sie nun Geräusche und unharmonische Obertöne berücksichtigen. Hier sei nur an die Veröffentlichungen erinnert, welche sich mit den Einschwingvorgängen auseinandersetzen, vor allem die Arbeiten von Fletcher [10, 11], Nolle [12, 13], Nolle und Finch [14], sowie Verge *et al.* [15, 16, 17].

tioned the origin of the analysed sounds, nor the conditions under which they were recorded.

More recently, Angster and Miklos [6] analysed the modifications of the initial transients as a function of the voicer's work. Indeed, voicers are mainly concerned with mouth parameters. The authors assumed that edge tones play a major role in the build-up of the tone from flue like pipes, and that one of the voicer's objectives is to tune the lowest component of the edge tone on the first pipe harmonic. However, the acoustical analysis of organ pipe transients, subsequently presented in different publications [7, 8, 9], only displays the amplitude evolution of the harmonics, mentioning neither noises nor inharmonic sounds notwithstanding any relationship with changes in the edge tones.

### 1.2 Experiments and models for jet behaviour during transients

In the last twenty years, many theoretical publications have been devoted to sound production in flue like instruments. Some models have even been progressively refined in order to take into account noises and inharmonic sounds. Here are only recalled publications devoted to transients, particularly the works of Fletcher [10, 11], Nolle [12, 13], Nolle and Finch [14], and Verge *et al.* [15, 16, 17].

In his first theoretical publication, Fletcher [10] developed a simplified model for the jet and its interaction with the acoustical field in the pipe, in order to compute the velocity amplitude for the first three pipe modes. He showed that the time evolution of the three modes is a function of the shape of the pressure build-up during the transient. Three types of transient profiles were considered according to the ratio between the mean static pressure ( $p_0$ ) and the "initial" pressure ( $p_I$ ) reached after the first 10 milliseconds. In order to obtain reasonable behaviour of transients, Fletcher [10] makes sure that the pressure in the foot builds up quickly above the stationary pressure. He postulates that these types of behaviour are due to interferences between the acoustical waves in the wind supply system. Three classes of transients are

blissement de l'amplitude de chaque harmonique. En 1972 Keeler [5] caractérise, sur la base d'une analyse de 200 tuyaux les durées moyennes des transitoires pour chaque famille de jeux d'orgue, soit 25 à 30 périodes pour les flûtes, 50 pour les principaux, plus de 40 périodes pour les gambes. L'auteur ne mentionne pas l'origine des sons analysés ni les conditions dans lesquelles ils ont été enregistrés.

Plus récemment Angster et Miklos [6] analysent les modifications du transitoire d'attaque en fonction des actions de l'harmoniste qui, on le sait, portent principalement sur les paramètres de la bouche. Les auteurs posent comme hypothèse que les sons de biseau joueraient un rôle prépondérant dans l'élaboration du son des tuyaux à embouchure de flûte. Un des objectifs de l'harmoniste serait d'accorder la composante la plus basse du son de biseau sur un des premiers harmoniques du tuyau. Toutefois, les analyses acoustiques des transitoires de tuyaux d'orgue publiées dans les différentes études [7, 8, 9] ne font état que de l'évolution en amplitude des harmoniques du tuyau, sans faire état des bruits ou des sons inharmoniques, ni d'une éventuelle relation avec les modifications des sons de biseau.

### 1.2 Expérimentation et Modélisation du comportement du jet en transitoire

Ces vingt dernières années, la production du son dans les instruments à embouchure de flûte a fait l'objet d'un grand nombre de travaux théoriques, plusieurs auteurs s'attachant à développer des modèles de production sonore qui peuvent prendre progressivement en compte des phénomènes plus complexes : bruits et sons inharmoniques. Nous n'exposerons ici que les recherches consacrées aux transitoires, et plus particulièrement les travaux de Fletcher [10, 11], Nolle [12, 13], Nolle et Finch [14], et Verge *et al.* [15, 16, 17].

Dans une première étude théorique, Fletcher [10, 11] développe un modèle du comportement simplifié du jet et de son interaction avec le champ acoustique dans le tuyau, pour calculer les amplitudes des vitesses des trois premiers modes du tuyau. Les résultats fournissent l'évolution temporelle des 3 modes en fonc-

In seiner ersten theoretischen Veröffentlichung entwickelte Fletcher [10] ein vereinfachtes Modell für das Luftband und seine Wechselwirkung mit dem akustischen Feld in der Pfeife, um die Amplituden der Schallschnelle der ersten drei Resonanzen einer Pfeife zu berechnen. Er zeigte, dass die Zeitentwicklung der drei Modi eine Funktion der Art des Druckaufbaus während des Einschwingens ist. Entsprechend dem Verhältnis zwischen dem durchschnittlichen statischen Druck ( $p_0$ ) und dem "Anfangsdruck" ( $p_1$ ), welcher nach den ersten zehn Millisekunden erreicht wird, wurden drei Typen von Einschwingprofilen berücksichtigt. Um ein vernünftiges Verhalten der Einschwingvorgänge zu erreichen, stellt Fletcher [10] sicher, dass der Druck im Fuß schnell höher als der stationäre Druck ansteigt. Er setzt voraus, dass dieses Verhalten von Interferenzen zwischen akustischen Wellen im Windversorgungssystem verursacht wird. Es werden drei Klassen von Einschwingvorgängen untersucht: "explosive" für  $p_1 \gg p_0$ , "abrupte" für  $p_1 = p_0$  und "langsame" für  $p_1 \ll p_0$ . Für "explosive" Einschwingvorgänge produziert das Modell eine anfängliche Vorherrschaft zweiten Eigenresonanz während der ersten 150 ms, die drei Eigenresonanzen verbleiben unharmonisch. Fletcher betrachtete diese Gruppe von Einschwingvorgängen als mögliche Erklärung des "chiff" von Orgelpfeifen.

In einer zweiten Arbeit [11] kommt Fletcher auf diese Interpretation zurück. Diese Arbeit behandelt die Emission der ersten drei Pfeifenresonanzen bei stetig ansteigendem Druck. Berechnungen werden mit Messungen verglichen, welche an einer verstellbaren Pfeife mit variablem Aufschnitt und Kernspalte durchgeführt wurden. Das Modell ermöglicht es, die Einschwingvorgänge der Pfeife unter verschiedenen Voraussetzungen vorherzusagen: unterblasend (*Underblown*), normal und überblasend (*Overblown*). Fletcher schlägt weiterhin vor, dass der charakteristische "chiff" von Barockorgelpfeifen in enger Beziehung zum unterblasendem System steht.

Schon 1941 studierte Nolle die Einschwingvorgänge an 28 realen Orgelpfeifen, wobei er globale Oszillogramme ohne Filter nutzte. Er analysierte die Zeitcharakteristiken der Einschwingvorgänge als eine Funktion der Grundton-

analysed: "plosive" for  $p_1 \gg p_0$ , "abrupt" for  $p_1 = p_0$  and "slow" for  $p_1 \ll p_0$ . For "plosive" transients, the model produces initial predominance of the second mode during the first 150 ms, the three modes remaining inharmonic. Fletcher considered this class of transient as a possible explanation for the "chiff" of organ pipes.

In a second paper [11], Fletcher returns to on this interpretation. The paper models the emission of the three first modes of a pipe under steadily increasing pressure. Computations are compared with measurements carried out on an adjustable pipe with variable mouth cut-up and flue width. The model makes it possible to predict the pipe transients under several regimes: *Underblown*, *Normal*, and *Overblown*. Fletcher further suggests that the characteristic "chiff" of baroque organ pipes is closely related to the *Underblown* regime.

As far back as 1941, Nolle studied the initial transients of 28 real organ pipes using global oscillograms without filtering. He analysed the time characteristics of the transients as a function of the fundamental frequencies for different families of stops: *bourdon*, *flute*, *diapason* and *string*. He observed tones that are slightly inharmonic in the transients of the *bourdon* and *flute* families, yet admitting that the frequencies of such transients could not be measured precisely.

In 1979, Nolle published a series of experiences made with a pipe specially designed to allow fine and accurate adjustments of the main geometrical parameters: mouth parameters, such as mouth height, flue thickness, position of the labium with respect to the flue as well as pipe parameters, such as the overall length, and whether the pipe is open or closed. The cross section of the pipe could either be cylindrical or rectangular. The air supply, controlled by a pallet placed below the foot, provided for reproducible transients of the "abrupt" type. The variations in sound quality due to modifications of mouth heights and jet directions are described with the help of adjectives and onomatopoeia. In the domain where the pipe speaks well, Nolle identifies two types of transients. "ping" transients, also called xylophone-type, correspond to quasi-periodic oscillation, close to

tion de la forme d'établissement de la pression pendant l'attaque. Trois types d'attaques sont considérées selon les valeurs relatives de la pression statique moyenne ( $p_0$ ) et de la pression initiale ( $p_1$ ) atteinte au bout des 10 premières millisecondes. Pour obtenir un comportement raisonnable de l'attaque, Fletcher [10] assure une pression dans le pied présentant une montée rapide au dessus de la pression stationnaire. Il suppose que ce genre de comportement est dû à des interférences d'ondes acoustiques dans le système d'alimentation de l'orgue. Trois classes de transitoires sont examinées: "plosive" pour  $p_1 \gg p_0$ , "abrupte" pour  $p_1 = p_0$  et "lente" pour  $p_1 \ll p_0$ . Pour le transitoire de type "plosive" le modèle produit la dominance initiale du mode 2 (de 0 à 0,15 sec) les trois modes restant inharmoniques. Fletcher considère dans cette forme d'attaque une explication possible de la nature du "chiff" des tuyaux d'orgue.

Dans un second article [11] Fletcher revient sur cette interprétation. L'étude rend compte de l'émission des trois premiers modes d'un tuyau soumis à une pression régulièrement croissante. Les résultats du calcul sont comparés aux mesures réalisées avec un tuyau réglable dont on peut modifier la hauteur de bouche et la largeur de la lumière. Le modèle permet de prévoir le fonctionnement du tuyau dans diverses conditions: le régime buccal (*Underblown*), normal (*Normal*) et octaviant (*Overblown*). La nature du "chiff" caractéristique d'un tuyau d'orgue baroque serait, selon Fletcher, à rechercher dans le fonctionnement "*Underblown*" du tuyau.

Dès 1941 Nolle publie une étude du transitoire d'attaque de 28 tuyaux d'orgue réels établie sur la base de l'oscillogramme global (sans filtrage). Il analyse les caractéristiques temporelles du transitoire en fonction de la fréquence fondamentale des tuyaux et pour différentes familles de tuyaux (bourdons, flûtes, principaux, gambes). Il note la présence de sons faiblement inharmoniques dans les transitoires d'un bourdon et d'une flûte tout en soulignant les limites d'une mesure précise de la fréquence de ces sons transitoires.

En 1979 Nolle publie les résultats d'une série d'expériences faites avec un tuyau spécialement conçu pour permettre

Frequenzen für verschiedene Registerfamilien: Gedackte, Flöten, Prinzipale und Streicher. Er beobachtete bei den Einschwingvorgängen von Gedackten und Flöten leicht unharmonische Töne, wobei er jedoch zugeben mußte, dass die Frequenzen dieser Einschwingvorgänge nicht präzise gemessen werden konnten.

1979 publizierte Nolle eine Serie von Beobachtungen, welche an einer speziell angefertigten Pfeife durchgeführt wurden. Diese ermöglichte es, akkurate Feineinstellungen der grundsätzlichen geometrischen Parameter vornehmen zu können: Mundparameter wie Aufschnitthöhe, Weite des Kernspaltes, Stellung des Oberlabiums zum Kernspalt wie auch Pfeifenparameter, beispielsweise die Gesamtlänge sowie die Abdeckung der Pfeife. Der Pfeifenquerschnitt konnte entweder zylindrisch oder rechteckig sein. Die Windversorgung, welche von einem Ventil unterhalb des Pfeifenfußes geregelt wurde, sicherte reproduzierbare Einschwingvorgänge des Typs "abrupt". Die Variationen der Klangqualität, welche sich durch Veränderungen der Aufschnitthöhen und der Veränderungen der Richtung des Luftbandes ergaben, wurden mit der Hilfe von Adjektiven und Lautmalerei beschrieben. In dem Bereich, indem die Pfeife gut spricht, identifiziert Nolle zwei Typen von Einschwingvorgängen: "ping"-Einschwingvorgänge, welche auch xylophon-typisch genannt werden und quasi-periodischen Schwingungen nahe des 3. oder 5. Obertones (bei gedeckten Pfeifen) entsprechen. Die "chiff"-Einschwingvorgänge klingen wie Geräuschbänder mit Tonhöhen nahe denselben Obertönen. Weiterhin analysiert der Autor einen "ping"-Einschwingvorgang durch Fourier-Analyse des abgetasteten Signals. Es werden auch mehrere Klangphänomene bezüglich der Schneidentöne beschrieben, doch sie werden nicht zu den beiden weiter oben erwähnten Einschwingvorgängen in Beziehung gesetzt *ping* und *chiff*.

In ihrer 1992 erschienenen Veröffentlichung präsentieren Nolle und Finch eine systematische experimentelle Analyse der Variationen der Ansprache-Einschwingvorgänge, wenn die Zeit des Druckaufbaus in der Pfeife variiert. Alle Experimente wurden anhand der weiter oben beschriebenen verstellbaren Pfeife ausgeführt. Das Windversorgungssystem, welches speziell für die Experimente

the third or the fifth harmonic (stopped pipe). "chiff" transients sounds like noise bands with pitches close to the same harmonics. The author also analyses a "ping" transient by Fourier analysis of the sampled signal. Several sound phenomena related to edge tones are also described but they are not set in relation with the two above mentioned transients (ping and chiff).

In their 1992s publication, Nolle and Finch present a systematic experimental analysis of the variations of the attack transients when the pressure rise time varies in the pipe. All the experiments are carried out on the adjustable pipe described above. The wind supply system, specifically built for the experiments, allows reproducible pressure rise profiles. A wind note channel with pallet is also used for very short transients. For each experiment, the authors give the pressure curves measured in the foot, the sound wave signals, and in some cases the rising curves for the amplitude of the fundamental and the third harmonic of the pipe.

In his description of attack transients, Nolle distinguishes between two types of events: the "forerunner", a high frequency inharmonic tone; and a "burst", generally corresponding to a sudden rise of amplitude for the second mode of the pipe, immediately before the fundamental builds up (*Next Mode Burst*). The burst, therefore, generally concerns the second harmonic of an open pipe, or the third harmonic of a closed pipe. But it is not clear whether it is an harmonic, because, as the authors say, "The component that evolves into the second or third harmonic is often sharp in the early stages. Even so, the signal components will be called harmonics for convenience" (page 2192). In fact, only sounds of type *Next Mode Burst* are taken into account in the model for describing and simulating the attack transient. The nature and the role of the forerunner are subjected to hypotheses which will be discussed below (Section 4.2).

Nolle concludes that the shape of the pressure rise determines both the build-up time of the sound, and the content of the transient in initial sounds. Taking as reference the rising time corresponding to the full build-up of the

le réglage fin et précis des principaux paramètres géométriques : les proportions de la bouche (hauteur de bouche, épaisseur de la lumière, positions du biseau par rapport à la lumière), la longueur totale du tuyau, l'état ouvert ou fermé. Un corps cylindrique peut aussi être substitué au tuyau rectangulaire. L'admission d'air contrôlée par une soupape placée à la base du pied produit des attaques reproductibles de type "abrupt". Les variations de sonorité engendrées par les changements de hauteur de bouche et de direction du jet sont décrites à l'aide d'adjectifs et d'onomatopées. Dans la zone de bon fonctionnement du tuyau Nolle identifie deux types d'attaques. L'attaque "ping" dite aussi de type xylophone, correspond à une oscillation quasi périodique proche de l'harmonique 3 ou de l'harmonique 5 (pour un bourdon). L'attaque "chiff" évoque un bruit de large bande dont la coloration principale est voisine des mêmes harmoniques. L'auteur donne l'analyse d'une attaque "Ping" obtenue par transformée de Fourier du signal échantillonné. Divers phénomènes sonores dus aux sons de biseau sont décrits également, mais sans être mis en relation avec les deux attaques mentionnées.

Le travail de 1992 présente une analyse expérimentale systématique des modifications du transitoire d'attaque avec le temps d'établissement de la pression dans le tuyau. Toutes les expériences sont réalisées avec le tuyau réglable décrit précédemment. Le dispositif d'alimentation en air, construit pour les besoins de l'expérience, permet des montées en pression reproductibles. Une gravure d'orgue avec soupape est également utilisée pour des attaques très brèves. Pour chaque expérience l'auteur donne les courbes de pression dans le pied, le signal acoustique global, et dans certains cas les courbes de montée en amplitude des harmoniques des deux premiers modes du tuyau.

Dans la description du transitoire d'attaque Nolle distingue deux types d'événements, le "précurseur", son de haute fréquence inharmonique, et un "burst" correspondant généralement à une brusque montée d'amplitude du deuxième mode du tuyau, immédiatement avant l'établissement du fondamental (*Next Mode Burst*). Le "burst" concerne donc généralement l'harmonique 2 d'un tuyau

gebaut wurde, erlaubt reproduzierbare Druck-Aufbau-Profile. Für sehr kurze Einschwingvorgänge wird eine Orgelwindkzelle mit Ventil genutzt. Für jedes Experiment geben die Autoren die im Fuß gemessenen Druckkurven, die Klangwellensignale und in einigen Fällen die Kurven der Amplitudenentwicklung des Grundtones sowie des 3. Obertones der Pfeifen an.

In seiner Beschreibung von Ansprache-Einschwingvorgängen unterscheidet Nolle zwischen zwei Typen von Ereignissen: dem "Vorläufer", einem hochfrequenten, unharmonischen Ton; und dem "burst", welcher im allgemeinen einem plötzlichen Anstieg der Amplitude der zweiten Eigenschwingung entspricht, kurz bevor der Grundton aufgebaut wird (*Next Mode Burst*). Deshalb betrifft "Burst" normalerweise den zweiten Oberton einer offener oder den dritten einer gedeckten Pfeife. Es ist jedoch nicht sicher, ob "Burst" der harmonischen Obertonreihe angehört, was die Autoren folgendermaßen begründen: "Die Komponente, welche sich im zweiten oder dritten Oberton entwickelt, ist im Frühstadium oft sehr schrill. Trotzdem werden diese Klangkomponenten der Einfachheit halber harmonisch genannt" (Seite 2192). Faktisch werden beim Modell zur Beschreibung und zum Simulieren des Ansprache Einschwingvorganges nur Klänge des Typs "*Next Mode Burst*" berücksichtigt. Die Natur und die Rolle des Vorläufertons sind Hypothesen unterworfen, die weiter unten im Text diskutiert werden (Abschnitt 4.2).

Nolle schlussfolgert, dass die Art des Druckaufbaus einerseits die Dauer des Klangaufbaus und andererseits den Inhalt des Einschwingvorganges bestimmt. Als Referenz dient ihm die Zeit, welche dem vollen Klangaufbau des Grundtones entspricht,  $t_{bf}$ , was bei der Experimentalpfeife ca. 10 Schwingungsperioden dauert. Er unterscheidet langsamen Grundtonaufbau (mehr als 10 Schwingungsperioden) und schnellen Grundtonaufbau (weniger als 10 Schwingungsperioden). Abrupter Grundtonaufbau (ca. eine Periode) wird als Spezialfall betrachtet, bei welchem eine impulsive Anregung des Resonanzkörpers wirkt. Der Vorläuferton und "*Next Mode Burst*" sind am stärksten beim schnellen Grundtonaufbau (weder langsam noch abrupt) ausgeprägt, d.h., sie dehnen sich typischerweise zwischen 1

fundamental,  $t_{bf}$  about 10 periods for his pipe, he distinguishes between slow rising times (longer than 10 periods) and fast rising times (less than 10 periods). Abrupt rise time (about one period of the fundamental) is considered as a particular case in which impulsive excitation of the resonator is taking place. The forerunner and the *Next Mode Burst* are strongest for fast rises (neither abrupt nor slow) extending typically from 1 to 10 periods of the fundamental. The emission, at the frequency of mode 1, of an external loud tone in front of the mouth (producing an internal pressure of about 10% of the pressure in the pipe under normal functioning), gives rise to two interesting results: a faster build-up of the fundamental (20 ms); and a cancellation of initial sounds.

Nolle suggests that the forerunner is due to the excitation of a transverse mode of the pipe. However, the importance of the side walls for edge tones, has been shown by Powell [18]. Therefore, even if the transverse resonance is not excited, side walls do influence the oscillation if the forerunner is an edge tone.

Later, Nolle developed a theoretical model restricted to oscillations corresponding to the resonator modes, thus excluding the forerunner. This model explains how the pipe is set into oscillations by pressure variations in the attack transients, and convincingly reproduces transient shapes similar to those observed, that is, presenting bursts at experimentally observed pressure variations.

The works of Fletcher and Nolle<sup>1</sup> concern organ pipes for which the ratio of the flue labium distance ( $w$ ) to the jet thickness ( $h$ ) is about 10. In this configuration, higher hydrodynamic modes are obtained in steady state. These modes are responsible for the coming back of sounds at the end of notes, when the pressure falls in the wind supply. Recent visualisations by Yoshikawa [19] have proved that these modes also create *Next Mode Burst* tones during the attack transients. For recorders, builders choose a ratio  $w/h$  of 4 which rejects the higher hydrodynamic modes. Fletcher's jet model [11] cannot take into account

ouvert et l'harmonique 3 d'un tuyau bouché. Mais on ne sait pas précisément s'il s'agit réellement toujours d'un harmonique car, nous dit l'auteur, "*the component that evolves into the second or third harmonic is often sharp in the early stages. Even so, the signal components will be called harmonics for convenience*" (page 2192). En fin de compte, seuls les sons de type *Next Mode Burst* seront pris en compte dans le modèle de description et de simulation du transitoire d'attaque. La nature et le rôle du précurseur font l'objet d'hypothèses que nous exposerons dans la discussion finale, au paragraphe 4.2

Nolle conclut que la forme de la montée en pression détermine le temps d'établissement du son ainsi que le contenu du transitoire en sons initiaux. En prenant comme référence le temps de montée nécessaire à l'établissement du fondamental jusqu'à son amplitude totale,  $t_{bf}$ , soit environ 10 périodes pour le tuyau de son expérience, il distingue les temps de montée longs (beaucoup plus que 10 périodes) des rapides (moins de 10 périodes). L'attaque percussive (de l'ordre de la période du fondamental) est considérée comme un cas particulier faisant intervenir une excitation impulsive du résonateur. Le précurseur et le *Next Mode Burst* sont les plus intenses pour les montées rapides (ni percussive, ni lente) plus précisément entre 1 et 10 fois la période du fondamental. L'émission d'un son intense devant la bouche (produisant une pression interne supérieure de 10% à celle due au tuyau en fonctionnement normal) à la fréquence du mode 1, fournit deux résultats intéressants : l'établissement plus rapide (20 ms) du fondamental et l'annulation des sons initiaux.

Nolle suggère que le "précurseur" est dû à l'excitation d'un mode transversal du tuyau. L'importance de la présence de parois pour le comportement d'un système "son de biseau" a été démontrée par Powell [18]. Même si la résonance transversale n'est pas excitée et que ce précurseur est un "son de biseau", il est certain que la présence de parois affecte l'oscillation.

Nolle développe ensuite un modèle théorique "restreint aux oscillations correspondant aux modes du résonateur" (ce qui exclut la prise en compte du précurseur). Ce modèle rend compte de la mise

1 A. Hirschberg, personal communication

und 10 Perioden des Grundtones aus. Die Emission eines lauten Tones vor dem Pfeifenmund mit der Frequenz des Grundtones (welcher einen internen Pfeifendruck erzeugt, der ca. 10% über dem normalen Pfeifendruck liegt) ergibt zwei interessante Resultate: ein schnellerer Aufbau des Grundtones (20 ms) und das Unterdrücken der initialen Klänge.

Nolle schlägt vor, dass der Vorläufer von einer Transversalschwingung verursacht wird. Jedoch wurde die Bedeutung von seitlichen Wandungen für Schneidentöne von Powell [18] gezeigt. Wenn der Vorläufer jedoch ein Schneidenton ist, beeinflussen seitliche Wandungen selbst dann die Schwingung, wenn die transversale Resonanz nicht angeregt wurde.

Später entwickelte Nolle ein theoretisches Modell, welches sich auf Schwingungen beschränkt, die den Eigenresonanzen entsprechen — folglich wird der Vorläufer ausgeschlossen. Dieses Modell erklärt, wie die Pfeife durch Druckvariationen bei den Ansprache-Einschwingvorgängen in Schwingungen versetzt wird. Es reproduziert überzeugende Einschwingverläufe, welche ähnlich den beobachteten sind, d.h., mit "bursts" bei experimentell registrierten Druckvariationen.

Die Arbeiten von Fletcher und Nolle<sup>1</sup> betreffen Orgelpfeifen, für welche das Verhältnis zwischen Aufschnitthöhe ( $w$ ) und Weite des Kernspaltes ( $h$ ) ca. 10 beträgt. Bei dieser Konfiguration werden im stabilen Zustand höhere hydrodynamische Eigenschwingungen erreicht. Diese Eigenschwingungen sind verantwortlich für das Entstehen von Klangfarben am Ende einer Note, wenn der Druck der Windversorgung abfällt. Vor kurzem realisierte graphische Darstellungen von Yoshikawa [19] haben bewiesen, dass diese Schwingungen während der Ansprache-Einschwingvorgänge auch "Next Mode Burst"-Töne hervorbringen. Bei Blockflöten wählen die Hersteller ein Verhältnis von  $w/h = 4$ , welches höhere hydrodynamische Eigenschwingungen verhindert. Das Luftband-Modell von Fletcher [11] erlaubt es nicht, die nichtlineare Sättigung (Bildung von Luftwirbeln) zu berücksichtigen, welche jedoch die Schwingungen des Luftbandes bei höheren hydrodynamischen

non-linear saturation (whirl formation) which characterises jet oscillations in higher hydrodynamic modes. All models over-estimate these modes.

Hirschberg and his collaborators have contributed to a better description of the transient phenomena by introducing visualisation techniques. Their experimental pipe, with square cross section, has the same dimensions as the one foot diapason, and a mouth similar to one of a recorder. The mouthpiece is simplified for the sake of visualisation and the chamfers at the flue exit are replaced by right angles 90° wedges. Thanks to these visualisations, Mahu *et al.* [20] and Verge [16] could explain the main differences measured during very short (2 ms) and very soft (20 ms) attack transients. More recently, the sound synthesis model developed by Verge accounts for jet oscillation, whirl separations at the wedges, and turbulences in the mouth. For recorders, this model gives, for different pressure rises, signals that are very similar to the signals recorded on a real instrument [16, 17, 21]. However, the jet model used by Verge [17] is similar to Fletcher's [11]: it cannot properly describe the attack transients of organ pipes.

### 1.3 Remarks

At this point, it is necessary to make the following remarks. Except for Angster's work [9] realised together with organ builders, recent acoustical studies on transient sounds lay upon a small number of experiments which generally are not representative of musical reality, although they are very accurately carried out. The pipe used by Fletcher [11] does not display the famous "chiff". The organ pipe used by Nolle [13, 14] is adjustable so that its length can be modified, and can be played as a bourdon or as an open pipe, making it possible to experimentally study the influence of modal inharmonicity on attack transients. It is well known however, that changing the scale or the functioning mode (open or closed), requires adapting the mouth differently so that the pipe speaks properly. Transients displayed for different adjustments of the pipe cannot therefore be compared because the mouth has been changed each time. And the experimental organ pipe used by Hirschberg for visualising

en oscillation du tuyau en fonction de la variation de pression à l'attaque et produit de façon convaincante des formes de transitoire analogues à celles qui ont été observées, c'est à dire avec des "burst" se produisant pour les variations de pression observées expérimentalement.

Les travaux de Fletcher et Nolle<sup>1</sup> concernent des tuyaux d'orgue pour lesquels le rapport de distance ( $w$ ) lumière/biseau à l'épaisseur ( $h$ ) du jet est de l'ordre de 10. Dans cette configuration on a des modes hydrodynamiques supérieurs en régime stationnaire. Ces modes sont responsables de la résurgence du son à la fin d'une note, lors de la baisse de pression dans l'alimentation de l'aire. La visualisation récente de Yoshikawa [19] montre que ces modes sont responsables, au cours du transitoire d'attaque, des sons *Next Mode Burst*. Dans le cas de la flûte à bec les facteurs choisissent un rapport  $w/h = 4$  qui évite l'apparition des modes hydrodynamiques supérieurs. Le modèle de jet de Fletcher [11] ne permet pas de rendre compte de la saturation non-linéaire (formation de tourbillons) qui caractérise l'oscillation du jet dans les modes hydrodynamiques supérieurs. Les modèles exagèrent ces modes.

Hirschberg et ses collaborateurs contribuent, par l'apport de techniques de visualisation, à une meilleure description des phénomènes transitoires. Le tuyau expérimental de section carrée a les dimensions d'un principal de un pied, avec une embouchure qui se rapproche de celle d'une flûte à bec. L'embouchure est simplifiée pour les besoins de la visualisation et les chanfreins ont été remplacés par des angles de 90° à la sortie de la lumière. A l'aide de ces visualisations Mahu *et al.* [20] puis Verge [16] expliquent les principales différences mesurées pendant des attaques très brèves (2 ms) et lors d'une attaque molle (20 ms). Plus récemment, le modèle de simulation pour la synthèse sonore développé par Verge rend compte des effets sur le son du tuyau, des oscillations du jet, des détachements de tourbillon au biseau et des turbulences observables dans la bouche. L'application à la flûte à bec donne, pour différentes montées en pression, des signaux extrêmement proches des signaux captés sur un instru-

1 A. Hirschberg, persönliche Kommunikation

1 A. Hirschberg, communication personnelle



Eigenschwingungen charakterisiert. Alle Modelle übertreiben diese Schwingungen.

Durch die Einführung von Visualisierungstechniken haben Hirschberg und seine Mitarbeiter dazu beigetragen, eine bessere Beschreibung des Einschwing-Phänomens zu liefern. Ihre Experimentalpfeife mit ihrem quadratischen Querschnitt hat die gleichen Abmessungen wie ein Prinzipal 1', der Pfeifenmund ist dem einer Blockflöte ähnlich. Das Mundstück ist für eine Erleichterung des Experimentes und eine bessere grafische Darstellbarkeit vereinfacht worden; die Kernphase wurde durch einen 90°-Winkel ersetzt. Dank dieser Visualisierung konnten Mahu und al. [20] sowie Verge [16] die hauptsächlichsten Unterschiede erklären, welche bei sehr kurzen (2 ms) und sehr sanften (20 ms) Ansprache-Einschwingvorgänge gemessen wurden. Das vor kurzem von Verge entwickelte Klangsynthese-Modell erklärt Schwingungen des Luftbandes, die Abscheidung von Wirbeln an den Labien und Turbulenzen im Pfeifenmund. Für Blockflöten liefert dieses Modell bei verschiedenartigem Druckaufbau Signale, welche denen bei realen Instrumenten aufgenommenen sehr ähnlich sind [16, 17, 21]. Jedoch ist das von Verge [17] genutzte Modell des Luftbandes dem von Fletcher [11] sehr ähnlich; es kann die Ansprache-Einschwingvorgänge von Orgelpfeifen nicht genau beschreiben.

### 1.3 Anmerkungen

An diesem Punkt wird es notwendig, die folgenden Anmerkungen einzufügen. Außer der Arbeit von Angster [9], welche gemeinsam mit Orgelbauern durchgeführt wurde, stützen sich neuere Studien über Einschwingvorgänge auf eine kleine Anzahl von Experimenten, welche im allgemeinen nicht repräsentativ für die musikalische Realität sind, obwohl sie sehr sorgfältig durchgeführt wurden. Die von Fletcher [11] genutzte Pfeife erzeugt nicht den berühmten "chiff". Die Länge der von Nolle [13, 14] genutzten Orgelpfeife ist regulierbar und sie kann als gedeckte oder offene Pfeife gespielt werden. Sie ermöglicht experimentelle Studien des Einflusses von mehr oder weniger harmonischen Obertönen auf den Ansprache-Einschwingvorgang. Es ist jedoch gut bekannt, dass eine Veränderung der Pfeifenmessungen oder der Funktionsart

the jet presents sharp edges, in order to simplify the description of the flow. Such an instrument is far from being realistic for musical use.

Secondly, the works of Fletcher, Nolle and Verge quoted above do not display time/frequency analysis of the attack transients. Neither the precise frequencies nor the time evolution is given for sounds designated by such words as "forerunner, ping, chiff, burst". Their description is most often simplified: high pitched tone, higher harmonics (2<sup>nd</sup> or 3<sup>rd</sup>). In fact, the waveforms of the acoustic signals they used are driven predominantly by the first two harmonics which prove strongest. In linear amplitude scales, the forerunner component, which displays a very low level, is compressed, and scarcely distinguishable from the background noise. Last but not least, the sound "quality" of the attack transients, and whether they are representative or not of an actual adjustment by a voicer for musical use, are rarely indicated.

The present work proceeds along a different line, inasmuch as the framework proposed for describing the acoustical phenomena that take place during the transients has slowly emerged from listening and analysing the sounds of musical instruments of acknowledged quality. It aims at accounting for the perceptive characteristics of these sounds. For many years, the author has practiced several flutes, both recorders and transverse flutes, has tried instruments from different builders, and has also worked together with organ builders when voicing flue organ pipes according to different sound aesthetics. Experience has shown that "mouth sounds", which are produced during the attack transients, are of paramount importance when judging sound quality. Therefore, an analysis technique is required that can very accurately describe mouth sounds. Time/frequency spectrography of the *Sona-Graph* type, developed for speech analysis, where acoustical information is principally contained in transients, has proved best suited to analysing musical transients [22, 23]. Moreover, an experimental technique, developed earlier for flue type pipes [24], in order to separately analyse the sounds produced by the mouthpiece of a given

ment réel [16, 17, 21]. Le modèle de jet employé par Verge [17] est semblable à celui de Fletcher [11] et ne permet donc pas non plus de décrire avec précision l'attaque d'un tuyau d'orgue.

### 1.3 Remarques

Ces travaux appellent les remarques suivantes. A l'exception des travaux d'Angster [9] réalisés avec la collaboration d'un facteur d'orgue, les recherches récentes sur l'étude acoustique des sons transitoires que nous venons d'exposer reposent sur un petit nombre d'expérimentations, certes fines et précises, mais généralement peu représentatives de la réalité musicale. Le tuyau utilisé par Fletcher [11] ne possède pas le fameux "chiff"... Le tuyau d'orgue expérimental utilisé par Nolle [13, 14] est réglable, ce qui permet de modifier la longueur, de fonctionner en bourdon ou en tuyau ouvert, et d'effectuer ainsi d'intéressantes expériences sur le rôle de l'inharmonicité des modes dans le transitoire d'attaque. Mais on sait que pour changer les dimensions (taille) ou le mode de fonctionnement (ouvert ou bouché) il faut nécessairement adapter différemment la bouche afin de faire parler correctement le tuyau. Les transitoires présentés pour différents réglages du tuyau ne sont donc pas comparables puisque le fonctionnement de l'embouchure a été modifié d'une fois sur l'autre. Enfin le tuyau d'orgue expérimental utilisé par Hirschberg pour la visualisation du jet, possède des arêtes très vives afin que les conditions d'écoulement puissent être décrites plus facilement. Un tel instrument est peu réaliste en facture.

En second lieu, les travaux cités de Fletcher, Nolle et Verge ne fournissent pas d'analyse spectrale fine du transitoire d'attaque. On ne connaît pas précisément les fréquences, ni l'évolution temporelle des sons désignés par "précurseur, ping, chiff, burst". Leur description est le plus souvent simplifiée: son aigu, harmonique supérieur (2 ou 3). De fait, la forme globale du signal acoustique temporel utilisée dans ces recherches est largement dominée par les ondes des premières composantes, les plus intenses donc les mieux observables, d'autant que l'échelle d'amplitude est linéaire. Enfin on n'a que rarement des indications sur la "qualité" sonore des attaques étudiées, et le fait qu'elles sont représentatives ou

(offen oder gedeckt) bedingt, dass der Pfeifenmund angepasst wird, damit die Pfeife gut spricht. Einschwingvorgänge, welche bei den unterschiedlichen Einstellungen aufgetreten sind, können deshalb nicht miteinander verglichen werden, weil der Pfeifenmund jedes Mal verändert wurde. Und die von Hirschberg genutzte Experimentalpfeife für die Visualisierung des Luftbandes besitzt sehr scharfe Kanten, um die Beschreibung der Luftströmung zu vereinfachen. Ein solches Instrument ist weit davon entfernt, für die musikalische Nutzung sinnvoll zu sein.

Zweitens weisen die oben erwähnten Arbeiten von Fletcher, Nolle und Verge keine *Zeit/Frequenz-Analyse* der Ansprache-Einschwingvorgänge auf. Es werden weder die exakten Frequenzen noch die zeitliche Entwicklung für solche Begriffe wie "Vorläufer, *ping*, *chiff*, oder *burst*" angegeben. Deren Beschreibung ist in den meisten Fällen vereinfacht: hoher Ton, höhere Obertöne (2. oder 3.). In der Tat sind die Wellenformen der akustischen Signale, welche bei deren Forschungen genutzt werden, hauptsächlich dominiert von den ersten beiden Obertönen, welche am intensivsten sind. Bei linearen Amplitudenskalen wird die Komponente des Vorläufertons, welcher ein sehr niedriges Niveau aufweist, sehr komprimiert und ist kaum von den Hintergrundgeräuschen zu unterscheiden. Nicht zuletzt wird die Klangqualität des Ansprache-Einschwingvorganges und die Frage, ob die aktuelle Einstellung repräsentativ ist für eine von einem Intonateur für musikalische Nutzung vorgenommenen, kaum erwähnt.

Die vorliegende Arbeit geht einen anderen Weg im folgenden Sinn: der Rahmen welcher vorgeschlagen wird, um die akustischen Phänomene zu beschreiben, die während den Einschwingvorgängen auftreten, ist nach und nach entstanden, ausgehend vom Anhören und Analysieren der Klänge von Musikinstrumenten anerkannter Qualität. Er zielt darauf ab, die wahrnehmbaren Charakteristiken dieser Klänge zu erklären. Seit vielen Jahren spielt die Autorin verschiedene Flöten, sowohl Block- als auch Querflöten, hat Instrumente verschiedener Hersteller getestet und hat auch mit Orgelbauern zusammengearbeitet, als diese Labialpfeifen verschiedener Klangästhetiken intonierten. Die Erfahrung hat gezeigt, dass Mundtöne,

instrument, has been systematically applied to compare the spectrographic contents of the attack transients of the mouthpiece alone, to those of the whole instrument.

All analyses of transient phenomena in flue pipes put forward in this paper are based on systematic experimentation where each parameter variation has been studied by time frequency/analysis of the corresponding sound signals.

## 2 Experimental method

### 2.1 Spectrography of attack transients

As already mentioned, the sound waveforms analysed by Nolle and Finch [14] or Verge *et al.* [16, 17, 21], suffer from a major drawback: they give most weight to high amplitude components that mask simultaneous high frequency components with lower amplitudes. However, these last components can be predominant for the human ear, which is mostly listening to very short and quickly changing phenomena, especially if their frequencies falls within the area of high sensitivity (3000 Hz). To illustrate this point, the first experiment compares the waveform of an attack transient with its narrowband spectrographic analysis that gives the same weight to each signal component, be they harmonic or not, and makes it possible to follow the time evolution of each of them separately.

Let us take a cylindrical organ pipe made of tin, with a conical foot (dimensions given in Table 1). The pipe is played through a device similar to a small organ and comprising a blower, a

non d'un réglage recherché en facture pour une production sonore intéressante.

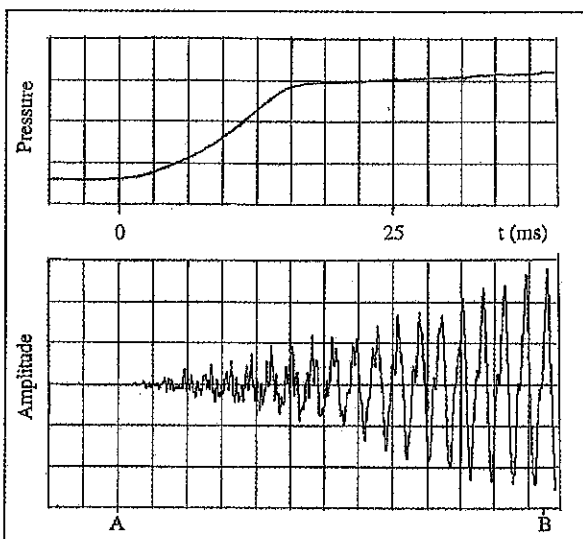
Le travail que nous présentons procède d'une démarche différente en ce sens que le cadre proposé pour la description des phénomènes acoustiques se produisant au transitoire, s'est peu à peu construit à partir de l'écoute et de l'analyse des sons d'instruments de musique de qualité reconnue, et avec pour objectif de rendre compte des particularités perceptives de ces sons. Au cours d'une longue expérience musicale l'auteur a pratiqué le jeu de plusieurs flûtes tant à bec que traversières, essayé des instruments de factures diverses, et a aussi travaillé avec des facteurs d'orgues sur l'harmonie des tuyaux à bouche, selon différentes esthétiques sonores. Les "bruits de bouche" se produisant à l'attaque étant apparus d'une importance primordiale dans l'appréciation de la qualité du son, nous avons recherché en premier lieu une technique d'analyse acoustique permettant de les décrire d'une manière fine. La spectrographie temps/fréquence, de type *Sona-Graph*, développée pour l'étude de la parole dont on sait que l'information acoustique est principalement contenue dans les transitoires, s'est révélée la mieux adaptée à l'étude des transitoires musicaux [22, 23]. En second lieu, nous avons systématiquement pratiqué une technique développée dans le cadre d'une étude expérimentale sur l'acoustique des tuyaux à embouchure de flûte [24], qui permet d'étudier séparément les sons produits par le système lame d'air-biseau de la bouche, afin de comparer leur contenu spectrographique à ceux du transitoire d'attaque du même instrument au complet.

Figure 1

Organ pipe No1, attack transient. Upper figure: pressure in the foot-pipe. Bottom figure: sound waveform.

Tuyau d'orgue N°1, analyse du transitoire d'attaque. Partie supérieure: pression enregistrée dans le conduit du pied. Partie inférieure: signal temporel.

Orgelpfeife Nr. 1, Ansprache-Einschwingvorgang. Oberer Teil: Druck in der Windleitung des Pfeifenfußes. Unterer Teil: Klangwellenform.



welche während der Ansprache-Einschwingvorgänge entstehen, für die Beurteilung der Klangqualität von ausschlaggebender Bedeutung sind. Deshalb ist eine Analysetechnik erforderlich, welche Mundtöne sehr präzise beschreiben kann. Zeit/Frequenz-Spektroskopie des Typs "Sona-Graph", welche für die Analyse der Sprache entwickelt wurde, wo akustische Informationen hauptsächlich in den Einschwingvorgängen enthalten sind, hat sich als am besten herausgestellt, um musikalische Einschwingvorgänge zu analysieren [22, 23]. Darüber hinaus wurde eine experimentelle Technik, welche früher für Labialpfeifen entwickelt wurde [24], um die vom Mundstück eines gegebenen Instrumentes ausgehenden Klänge separat analysieren zu können, systematisch dafür angewendet, die spektrografischen Inhalte von Ansprache-Einschwingvorgänge des separaten Mundstücks mit denen des kompletten Instrumentes zu vergleichen.

Alle Analysen von Einschwing-Phänomenen bei Labialpfeifen, welche in der vorliegenden Arbeit besprochen werden, basieren auf systematischen Experimenten, wo jede Variation eines Parameters durch die Zeit/Frequenz-Analyse des entsprechenden Klangsignals studiert wurde.

## 2 Experimentelle Methodik

### 2.1 Spektroskopie von Ansprache-Einschwingvorgängen

Wie schon erwähnt, haben die von Nolle und Finch [14] oder von Verge und al. [16, 17, 21] analysierten Klangwellenformen einen großen Nachteil: sie geben den Komponenten mit einer großen Amplitude das meiste Gewicht, welche aber gleichzeitig hochfrequente Komponenten mit kleineren Amplituden verdecken. Jedoch können letztere Komponenten vorherrschend für das menschliche Ohr sein, welches hauptsächlich auf sehr kurze und schnell wechselnde Phänomene hört, vor allem dann, wenn ihre Frequenzen in den Bereich hoher Sensibilität fallen (3000 Hz). Um diesen Punkt zu illustrieren, wird im ersten Experiment die Wellenform des Ansprache-Einschwingvorganges mit dessen spektrografischer Schmalband-Analyse verglichen, welche jeder Signalkomponente das gleiche Gewicht gibt, sei sie harmonisch oder nicht und welche es

regulator system, and a traditional wind tank (0.3m<sup>3</sup>) connected to a small chest. The last contains a parallelepipedic channel (10x75x250 mm<sup>3</sup>) with a rectangular pallet and a mechanical actuator that allows a wide range of reproducible attacks. Static pressures are measured with a piezoelectric sensor "microswitch" (176 pc 14 HG I) ranging from 0 to 3435 Pa. The cut-off frequency of the sensor measuring bridge amplifier system is 1 kHz. The sensor is connected to the cavity inside the foot by a flexible tube of diameter 1,25 mm. An electrodynamic directional microphone stands 25 cm in front of the mouth opening and records the sound of the pipe.

The outputs of the pressure sensor and the microphone are connected to the two channels of a digital FFT analyser (Sona-Graph/DSP 5500 from Kay Electronics) so that simultaneous analysis of the two signals can be carried out.

Figure 1 shows: a) the shape of the pressure rise in the foot of the pipe; and b) the microphone signal. High frequency phenomena can be seen at the very beginning of the signal as well as during the first periods of the fundamental. Between points A and B, the transient lasts about 40 ms (20 periods).

Figure 2 gives a longer excerpt from the same transient. Curve a) shows the sound waveform, and curve b) its time/frequency analysis<sup>2</sup> with intensity

L'interprétation acoustique des phénomènes transitoires des tuyaux à bouche proposée dans cet article est fondée sur l'exploitation comparée des données de l'expérimentation physique et de celles de l'analyse temps/fréquence du signal sonore.

## 2 Méthode expérimentale

### 2.1 Spectrographie du transitoire d'attaque

Nous avons déjà mentionné que la forme temporelle globale du signal sonore utilisée pour l'analyse sonore par Nolle et Finch [14] ou Verge *et al.* [16, 17, 21], a pour inconvénient de privilégier les composantes de grande amplitude, dont le tracé masque visuellement des phénomènes concomitant de haute fréquence et d'amplitude moindre. Or ceux-ci peuvent être prépondérants pour l'oreille, attentive aux phénomènes brefs et évolutifs, surtout s'ils sont situés dans sa zone de plus grande sensibilité (3000 Hz). Nous proposons dans la première expérience de comparer l'analyse d'un transitoire d'attaque représenté par la forme temporelle globale, puis par une analyse spectrographique en bandes fines privilégiant l'évolution temporelle des composantes, qu'elles soient harmoniques ou non.

Prenons un tuyau d'orgue cylindrique en étain, à pied conique, dont les dimensions sont données Tableau 1. L'instrument est joué par l'intermédiaire d'un

dispositif analogue à un petit mannequin d'orgue comportant un ventilateur, une boîte à rideau et un réservoir à plis parallèles (0,3 m<sup>3</sup>) connecté à un petit sommier. Celui-ci est muni d'une gravure (parallélépipédique 10x75x250 mm<sup>3</sup>) dont la soupape rectangulaire, actionnée mécaniquement, permet des attaques variées et reproductibles. Pour mesurer la pression nous utilisons un capteur piézo-électrique "microswitch" (176 pc 14 HG I) dont la plage de mesure est de 0 à 350 mm d'eau. La bande passante du système (capteur + pont de mesure + amplificateur) est de 1 kHz. Le capteur est raccordé à la cavité interne du pied par un tuyau souple de diamètre 1,25 mm. Un micro-

Table 1. Measurements in mm

Organ pipe	N°1	N°2
Material	Metal	Metal
Internal diameter	D = 28	D = 26
Pipe length	L = 291	L = 225,5
Scale	L/D = 10 Principal	L/D = 9 Principal
Wall thickness	0,5	0,7
Foot length	219	180
Mouth dimensions	1 x h = 20,5 x 5	1 x h = 20 x 4
Flue width	<0,5	<0,5
Alto recorder	N°1	N°2
Material	Plastic	Wood
Trade mark	Rahma	Aura baroque system
Internal ø of the mouthpiece	D = 18,2	D = 17,5
Wall thickness of the mouthpiece	7	—
Mouth dimensions	1 x h = 12 x 4	1 x h = 11 x 4
Duct length	59	55
Input section of duct	12 x 2	12,8 x 2,2
Output section of duct	12 x 0,75 (flue exit)	11 x 0,85 (flue exit)

ermöglicht, die zeitliche Entwicklung einer jeden separat zu verfolgen.

Also nehmen wir eine zylindrische Orgelpfeife aus Zinn mit einem konischen Fuß (die Messuren werden in Tabelle 1 angegeben). Die Pfeife wird durch ein Gerät angespielt, welches einer Kleinorgel ähnelt und über ein Gebläse, ein Reguliersystem und einen traditionellen Windkasten ( $0.3\text{m}^3$ ) verfügt, der mit einer kleinen Windlade verbunden ist. Letztere enthält eine quaderförmige Windkammer ( $10 \times 75 \times 250 \text{mm}^3$ ) mit einem rechteckigen Ventil und einen mechanischen Auslöser, der sehr verschiedenartige, reproduzierbare Anschläge erlaubt. Der statische Druck wird mit dem piezoelektrischen Sensor "Microswitch" (176 pc 14 HG 1) gemessen, welcher von 0 bis 3435 Pa reicht. Die Grenzfrequenz des Verstärkungssystems in der Messbrücke des Sensors beträgt 1 kHz. Der Sensor ist durch ein flexibles Rohr des Durchmessers 1,25 mm mit dem Inneren des Pfeifenfußes verbunden. Ein elektrodynamisches Richtungsmikrofon ist 25 cm vor der Mundöffnung aufgestellt und nimmt den Pfeifenklang auf.

Die Datenausgaben des Drucksensors und des Mikrofons sind mit den zwei Kanälen eines digitalen FFT-Analysators (Sona-Graph/DSP 5500 von Kay Elemetrics) verbunden, so dass beide Signale gleichzeitig analysiert werden können. Die Abbildung 1 zeigt: a) den Verlauf des Druckaufbaus im Pfeifenfuß und b) das Mikrofon-Signal. Phänomene hoher Frequenz können sowohl ganz zu Beginn des Signals als auch während der ersten Perioden des Fundamenttons beobachtet werden. Der Einschwingvorgang dauert zwischen den Punkten A und B ca. 40 ms (20 Perioden).

Abbildung 2 zeigt einen längeren Ausschnitt des gleichen Einschwingvorganges. Die Kurve a) zeigt die Wellenform des Klanges und Kurve b) gibt die Zeit/Frequenz-Analyse<sup>2</sup> wieder. Die Intensität wird durch die Strichstärke der Schraffierung angegeben. Die Obertöne des stabilen Klangzustandes sind entsprechend ihrer Reihenfolge am rechten Rand der Abbildung bezeichnet. Die Indikatoren A und B begrenzen das in Abbildung 1 dargestellte Zeitsegment.

Durch Abbildung 2b wird es möglich, die Natur der hochfrequenten Vorgänge,

2 Technische Daten für Abbildung 2: Abtastfrequenz = 20,48 kHz; Transformationslänge = 200 pts oder 9,76 ms; Überlappung = 25; Auslösung des Bildschirms = 8 Samples per Pixel

indicated by line shade width. The harmonics of the steady sound are labelled according to their order on the right hand side of the figure. The cursors A and B delineate the time segment displayed in Figure 1.

Figure 2b makes it possible to quickly grasp the nature of the high frequency events which are visible on the waveform of Figure 1b. The beginning of the transient is dominated by a rapid succession of very short components with ascending frequency reaching up to 4500 Hz (between H8 and H9), among which a more stable frequency with non negligible intensity can be noticed around harmonic H4. These components, which appear during the rise time of the fundamental, last about 30 ms and then vanish.

This is not a particular case. Having analysed in this way a very large number of attack transients from organ pipes and recorders, we can assert that time/frequency contents of transients are often very complex, vary extremely from one attack to the other, and can be neither reduced to only one forerunner nor to amplitude "bursts" of the 2<sup>nd</sup> or 3<sup>rd</sup> harmonic.

The next experiments will show that the quick frequency variations of the

2 Technical data for Figure 2: sample frequency = 20.48 kHz; transform size = 200 pts or 9.76 ms; overlap = 25; samples per pixel = 8

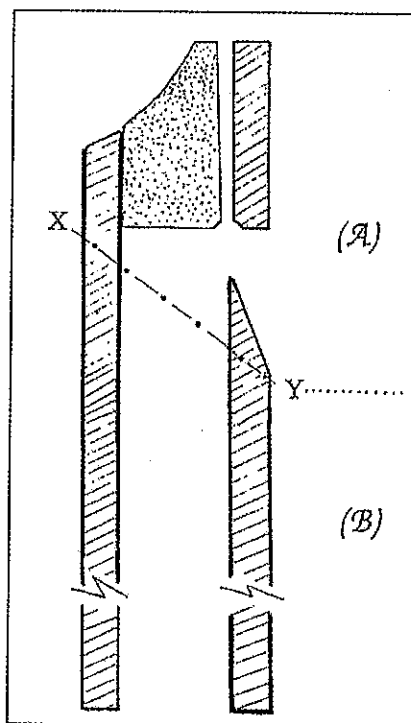


Figure 3

Sketch of the experimental recorder. The mouth (A) can be disconnected from the resonator (B) along the broken line XY. Part (A) alone constitutes an air jet/labium system.

Schéma de la flûte à bec séparable. La bouche, partie (A), peut être séparée du reste de l'instrument ou partie (B), selon le plan de coupe XY. La partie (A) seule est un système lame d'air/labseau.

Skizze der Experimental-Blockflöte. Der Flötenmund (A) kann vom Resonanzkörper (B) entlang der Linie XY getrennt werden. Teil (A) allein stellt ein Luftband/Labium-System dar.

phone électrodynamique directionnel placé à 25 cm devant l'ouverture de la bouche recueille le son rayonné par le tuyau.

Le signal du capteur de pression connecté au pied du tuyau et celui du microphone sont enregistrés simultanément sur les deux canaux d'un analyseur FFT numérique (Sona-Graph/DSP 5500 de Kay Elemetrics). Sur la figure 1 on voit en a) la courbe d'établissement de la pression dans le pied du tuyau et en b) le signal recueilli par le microphone. Des phénomènes de haute fréquence sont visibles dès le début du signal sonore et pendant les premières périodes d'établissement du fondamental. Le transitoire, compris entre les points A et B dure environ 40 ms (20 périodes).

Sur la figure 2 l'analyse du transitoire du même tuyau est représentée sur une échelle de temps plus agrandie. La courbe a) donne à nouveau le signal acoustique global. En b) est reproduite l'analyse fréquence/temps<sup>2</sup> avec une indication de l'intensité (noirceur et épaisseur des traits). Les harmoniques du son stationnaire sont repérés par leurs numéros d'ordre à la partie droite de la figure. La partie de signal comprise entre les deux curseurs A et B correspond au segment temporel analysé figure 1.

La représentation donnée figure 2 permet d'appréhender très rapidement la nature des événements de haute fréquence visibles sur le signal temporel de la figure 1. Le début du transitoire est dominé par une succession rapide de

2 Données techniques sur l'analyse de la figure 2 : fréquence d'échantillonnage = 20,48 kHz; Taille de la transformée = 200 pts soit 9,76 ms; Taux de recouvrement = 25; Affichage à l'écran = 8 échantillons par pixel

welche in der Wellenform der Abbildung 1b sichtbar sind, schnell zu erfassen. Der Beginn des Einschwingvorganges ist durch eine schnelle Folge von sehr kurzen Komponenten mit ansteigender Frequenz, welche bis zu 4500 Hz reicht (zwischen H8 und H9), dominiert. Dazwischen kann eine stabilere Frequenz mit nicht vernachlässigbarer Intensität im Bereich des 4. Obertones H4 beobachtet werden. Diese Komponenten, welche während der Aufbauzeit des Grundtones auftreten, dauern ca. 30 ms und verschwinden dann.

Dies ist kein Ausnahmefall. Nachdem wir auf diese Weise eine sehr große Anzahl von Ansprache-Einschwingvorgängen von Orgelpfeifen und Blockflöten analysiert haben, können wir aussagen, dass die Zeit/Frequenz-Inhalte von Einschwingvorgängen oft sehr komplex sind, zwischen den verschiedenen Ansprachevorgängen extrem variieren und weder auf nur einen Vorläuferton noch auf "bursts" der Amplitude des 2. oder 3. Obertones reduziert werden können.

Die nächsten Experimente wollen zeigen, dass die schnellen Frequenzvariationen, die während des Einschwingens auftreten, wichtige Informationen über jene Mechanismen liefern, welche während des Klangaufbaus wirken.

## 2.2 Akustische Analyse der Ansprache-Einschwingvorgänge für eine Blockflöte: Mund- und Schneidentöne

Eine Altblockflöte der Standardherstellung wurde vorsichtig entlang der Linie XY (Abbildung 3) aufgeschnitten. Dabei wurde die Rückwand der Blockflöte, welche knapp oberhalb des Kernes geschnitten wurde, entfernt, während das Labium des Instrumentes unverändert für die Erzeugung von Luftbänder blieb. Der somit isolierte obere Teil (A) des Mundstückes ist ein Kernspalt/Labium-System. Der Flötenkorpus (B) besteht aus dem Rest des Mundstückes, dem Körper und dem Fuß der Blockflöte. Daher ist es möglich, entweder (A) alleine anzuspielden oder die gesamte Flöte, indem (A und B) zusammengefügt werden. Das ganze System wird durch Knetmasse luftdicht verschlossen. Die Maße des Mundstückes

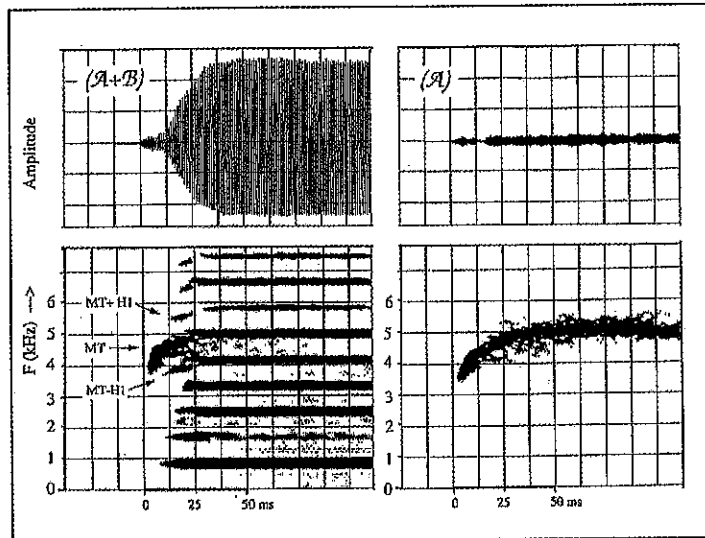


Figure 4

*Experimental recorder: attack transients analyses.* Upper part: waveform; lower part: time/frequency analysis. On the left: complete flute (A+B), all holes opened (fundamental frequency = 830 Hz). On the right: edge tone of the part (A) alone. The first noticeable mouth sound (MT) which appears at the beginning of the flute attack transient is quite the same as the edge tone (A).

*Flûte à bec séparable: analyse du transitoire d'attaque.* Partie supérieure, signal temporel. Partie inférieure, analyse temps/fréquence. La partie gauche de la figure concerne la flûte complète (A+B), tous les trous ouverts; fréquence fondamentale = 830 Hz. La partie droite concerne le système lame d'air-biseau isolé (A). On remarque que le premier son de bouche (MT) apparaissant au début du transitoire d'attaque de la flûte complète correspond exactement au transitoire du son de biseau isolé (partie A).

*Experimental-Blockflöte: Analyse des Ansprache-Einschwingvorganges.* Oberer Teil: Wellenform. Unterer Teil: Zeit/Frequenz-Analyse. Der linke Teil der Abbildung betrifft die komplette Flöte (A+B), wobei alle Löcher geöffnet sind (die Frequenz des Fundamenttons beträgt 830 Hz). Der rechte Teil betrifft das isolierte Luftband/Labium-System (A). Der erste wahrnehmbare Mundton (MT), welcher zu Beginn des Ansprache-Einschwingvorganges der Flöte erscheint, entspricht exakt dem Schneidenton (A).

sounds appearing during transients give valuable information on the mechanisms that are taking place during sound build-up.

composantes ascendantes de brève durée atteignant 4500 Hz (entre H8 et H9) parmi lesquelles on repère une fréquence plus stable, d'intensité notable, voisine de l'harmonique H4. Ces phénomènes qui apparaissent pendant la croissance en amplitude du fondamental,

durent environ 30 ms, puis disparaissent.

Il ne s'agit pas là d'un cas particulier. Ayant analysé de cette façon un très grand nombre de transitoires d'attaque de tuyaux d'orgue et de flûtes à bec, nous pouvons dire que le contenu spectrographique des transitoires est souvent très complexe, extrêmement variable d'une attaque à l'autre, et ne peut se réduire à la présence d'un seul précurseur ni à des "bouffées" d'amplitude des harmoniques 2 ou 3.

Nous allons montrer dans les expériences suivantes, que les rapides variations de fréquence des sons observables pendant le transitoire, peuvent apporter des informations précieuses sur la compréhension des mécanismes qui interviennent dans la formation du son.

## 2.2 Analyse acoustique du transitoire d'attaque d'une flûte à bec : sons de bouche et sons de biseau

Nous utilisons une flûte à bec alto de fabrication industrielle, qui a été soigneusement découpée pour les besoins de l'expérience selon la ligne XY (figure 3) de telle sorte que l'on élimine la paroi arrière de la flûte (sectionnée au niveau du bouchon) tout en conservant l'intégralité du biseau de l'instrument pour la production du jet. La partie supérieure de l'embouchure (A) ainsi isolée est un système lame d'air biseau. Le tuyau proprement dit (B) comprend le reste de l'embouchure, le grand corps et le pied de la flûte. On peut donc jouer indifféremment la partie (A) seule ou la flûte complète en associant (A+B). L'étanchéité est soigneusement assurée par de la pâte à modeler. Les dimensions du bec

**Figure 5**

*Experimental recorder.* Mouth graphs produced by part (A) only. The symbols correspond to experimental data, and curves I, II and III to the different hydrodynamic modes.

*Flûte à bec séparable.* Courbes buccales des mesures de fréquences produites par la partie (A) seule. Les symboles correspondent aux données expérimentales, et les courbes I, II et III pour différentes pressions d'alimentation.

*Experimental-Blockflöte.* "Mundgrafiken" von Frequenzmessungen, welche beim isolierten Teil (A) durchgeführt wurden. Die Symbole entsprechen den experimentellen Daten für unterschiedliche Winddrücke und die Kurven I, II und III den verschiedenen hydrodynamischen Eigenschwingungen.

und die Charakteristiken des Instrumentes werden in Tabelle 1 angegeben.

Die Blockflöte wird dann auf das weiter oben beschriebene Orgelsystem gestellt, um sicher zu gehen, dass man reproduzierbare Erregungen produziert. Das Output-Signal des Drucksensors, welches an die zum Pfeifenmund führende Windleitung angeschlossen ist und das Signal des Mikrofons, welches 25 cm vor dem Pfeifenmund aufgestellt ist, werden gleichzeitig aufgenommen und unter gleichen Bedingungen ausgewertet. Für einen bestimmten Fingersatz und einen gegebenen statischen Druck im Balg werden die komplette Flöte (A+B) und Teil (A) hintereinander angespielt, indem das gleiche Zeit/Druck-Profil für die Ansprache genutzt wird.

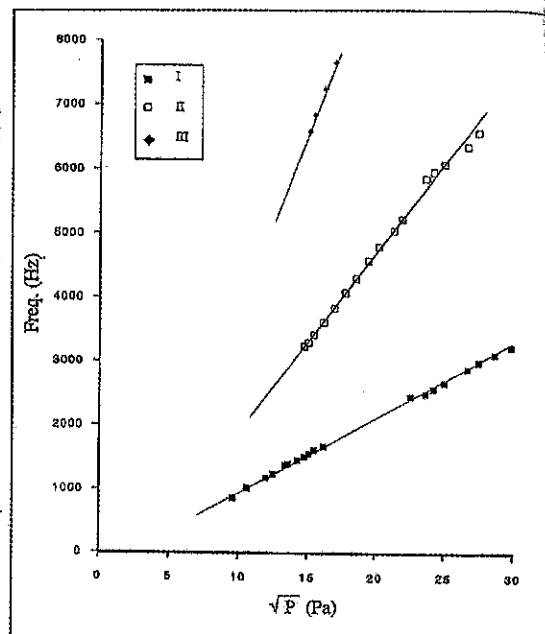
Das vom Mikrophon aufgenommene Klangsignal wird auf zwei verschiedene Arten in Abbildung 4 dargestellt: im oberen Teil die Wellenform und im unteren Teil die sonografische Zeit/Frequenz-Analyse. Betrachten sie zuerst im unteren Teil der Abbildung 4a den Ansprache-Einschwingvorgang des Tones, welcher bei der kompletten Flöte (A+B) entsteht. Die Zeit/Frequenz-Analyse, welche bei 8 kHz abbricht, zeigt den Aufbau der ersten 9 Obertöne. Der Fundamentton, welcher bei weitem der intensivste ist, wird vor allen anderen aufgebaut. Zeitlich (25 ms) geht ihm ein sehr hochfrequenter Ton mit aufsteigender Komponente zwischen 4 und 5 kHz voraus. Betrachten sie jetzt die Analyse des nur von Teil (A) erzeugten Klanges (Abbildung 4b). Die Zeit/Frequenz-Analyse zeigt einen einzigen Komponenten, welcher sich nach einem Einschwingvorgang von 25 ms bei ca. 5 kHz stabilisiert und dessen Frequenzentwicklung ähnlich dem hochfrequenten Vorläuferton in Abbildung 4a verläuft. Beim Vergleich der Wellenformen der beiden Abbildungen sieht man, dass die komplette Flöte (A+B) in den ersten 12 ms eine ähnliche Amplitude wie die von Teil (A)

## 2.2 Acoustical analysis of attack transients for a recorder: mouth tones and edge tones

A standard manufactured alto recorder was carefully cut along line XY (Figure 3), in such a way that the rear wall of the recorder, cut just above the cork, is taken away while the labium of the instrument is kept unaltered for jet production. The upper part (A) of the mouthpiece thus isolated is an air-jet/labium system. The pipe itself (B) consists of the rest of the mouthpiece, the body and the foot of the recorder. It is therefore possible to play either (A) alone or the whole recorder by joining together (A+B). The whole system is made airtight by use of modelling clay. The dimensions of the mouthpiece and the characteristics of the instrument are given in Table I.

The recorder is then set on the organ system described above, in order to ensure reproducible excitation. The output signal of the pressure sensor fixed on the air supply pipe to the mouth and the signal from the microphone placed 25 cm in front of the mouth are recorded simultaneously and analysed under the same conditions. For a given fingering and for a given static pressure in the air tank, the whole recorder (A+B), and only part (A) are successively played using the same time pressure profile for the attack.

The sound signal recorded by the microphone is presented in Figure 4 according to two representations: waveform in the upper part and sonographic time/frequency analysis in the lower part. Look first at the attack transient of the tone produced by the whole flute (A+B), in the lower part of Figure 4a. The time/frequency analysis, which cuts off at 8 kHz, displays the building up of the first 9 harmonics. The fundamental, by far the most intense, sets up before



et les caractéristiques de l'instrument sont données dans le tableau 1.

La flûte est placée sur le mannequin d'orgue décrit plus haut, de façon à assurer une excitation reproductible. Les signaux du capteur de pression fixé sur le conduit d'alimentation du bec, et ceux du microphone placé à 25 cm devant la bouche sont enregistrés et analysés dans les mêmes conditions.

Pour un doigté donné de la flûte et pour une pression statique donnée du réservoir, on joue successivement la flûte dans son entier (A+B) puis la partie (A) seule, en reproduisant les mêmes conditions de pression à l'attaque.

Le signal sonore capté par le microphone est présenté figure 4 sous les deux formes du signal temporel (partie supérieure) et de l'analyse spectrale de type sonographique (partie inférieure).

Observons tout d'abord le transitoire d'attaque du son produit par la flûte complète (A+B), en examinant la partie inférieure de la figure 4a. L'analyse spectrale, limitée à 8 kHz, montre l'établissement des 9 premiers harmoniques. Le fondamental, de loin le plus intense, s'établit avant tous les autres. Il est précédé dans le temps (25 ms) par un son aigu, de fréquence ascendante, évoluant entre 4 et 5 kHz. Observons maintenant l'analyse du son produit par la partie (A) seule (figure 4b). A la partie inférieure l'analyse spectrale montre une fréquence qui se stabilise autour de 5 kHz et dont la partie transitoire (25 ms) offre

allein erzeugte aufweist. In Bezug auf dieses Beispiel werden jetzt die Ausdrücke definiert, welche im Rest der Arbeit dazu verwendet werden, die verschiedenen Stadien von typischen Einschwingvorgängen von Lippenpfeifen zu beschreiben.

### 2.3 Definitionen

Die Blockflöte wurde so in zwei Teile geschnitten, dass Teil (A) nur aus dem Luftband/Labium-System besteht. Wie allgemein bekannt, produziert ein solches System Töne mit Frequenzen, welche mit dem Ansteigen des Winddruckes monoton ansteigen. Ein solches System verfügt auch über verschiedene Funktionsweisen und kann mehr oder weniger willkürlich von einer in die andere wechseln [24, 25, 26, 27] Die Frequenzen der von Teil (A) erzeugten Töne sind systematisch gemessen worden, wobei der Pfeifenmund über eine Reguliervorrichtung mit einem Druckluftbehälter verbunden war.

Abbildung 5 zeigt die Frequenzen, welche für Winddrücke von 100-900 Pa erhalten wurden. Die Resultate sind denjenigen ähnlich, welche bei einem klassischen Luftband/Labium-System gewonnen werden: Alle Punkte liegen auf den ersten drei hydrodynamischen Eigenschwingungen, welche von Bouasse auch "Mundgrafiken" ("*mouth graphs*") genannt werden. Mundtöne können auch sonografisch analysiert werden (siehe rechte Seite von Abbildung 14). Letztere Darstellung hat mehrere Vorteile: sie gibt die Intensität an, sie ermöglicht es, den spektralen Inhalt vor allem für Geräusche zu erfassen, und nicht zuletzt *erlaubt* sie einen *sofortigen Vergleich* mit Tönen des Einschwingvorganges in derselben Darstellung. Von Teil (A) allein erzeugte Töne werden Schneidentöne genannt.

Wenn man nun die komplette Flöte betrachtet (A+B), so entspricht hier der sogenannte Ansprache-Einschwingvorgang dem Aufbau des stabilen Klangzustandes in der Flöte. Seine zeitlichen Grenzen sind nicht leicht zu definieren, doch normalerweise betrachtet man das Amplitudenmaximum des Zeitsignals als das Ende des Einschwingvorganges. Im Beispiel von Abbildung 4a kann man einschätzen, dass die Dauer des Einschwingvorganges ca. 30 ms beträgt. Die komplette akustische Beschreibung muss daher alle die Phänomene berücksichtigen, welche stattfinden, bevor die letzten Obertöne aufgebaut sind. *Töne,*

all the others. It is preceded in time (25 ms) by a very high pitch tone, with ascending component developing between 4 and 5 kHz. Look now at the analysis of the sound produced by part (A) only (Figure 4b). The time/frequency analysis displays only one component that stabilises around 5 kHz after a transient lasting 25 ms and presenting a frequency evolution similar to the evolution of the high pitch forerunner in Figure 4a. When comparing waveforms in the two Figures, the waveform of the whole recorder (A+B) presents in its 12 first milliseconds an amplitude similar to that produced by part (A) alone. With reference to this example, let us now define the terms used in the rest of the paper for describing the different states of typical flue pipe transients.

### 2.3 Definitions

The recorder was cut in two pieces so that part (A) only consists of a air-jet/labium system. As is well known, such a system produces tones with frequencies that increase monotonically with air supply pressure. Such a system also displays several functioning regimes and can jump more or less arbitrarily from one regime to another [24, 25, 26, 27]. The frequencies of the tones produced by part (A) of the recorder have been systematically measured, the mouth being connected to a compressed air container through a regulator. Figure 5 displays the frequencies obtained for supply pressures in the interval 100 to 900 Pa. Results are similar to what is obtained with a classical air-jet/labium system: all points line up on the first three hydrodynamic modes, called "mouth graphs" by Bouasse. Mouth tones can also be analysed sonographically (see the right hand side of Figure 14). The latter representation has several advantages: it gives an indication of intensity; it makes it possible to appreciate the spectral content, especially for noises; and last but not least, it allows for an immediate comparison with transient tones under the same representation. *Tones produced by part (A) alone will be called edge tones.*

Considering now the whole recorder (A+B), what is usually called the attack transient corresponds to the building up of a stable regime in the

une évolution fréquentielle comparable à celle du son aigu précurseur visible en 4a. Si maintenant nous comparons les signaux temporels des deux figures, nous pouvons remarquer que celui de la flûte complète (A+B) présente dans les 12 premières millisecondes une amplitude comparable à celle du signal produit par la partie (A) isolée. En nous basant sur l'analyse de cet exemple simple, nous allons préciser le vocabulaire que nous emploierons pour décrire les étapes visibles d'un transitoire-type de tuyau à embouchure de flûte.

### 2.3 Vocabulaire

Telle qu'elle a été découpée dans la flûte à bec, la partie (A) est un système lame d'air-biseau. On sait [24, 25, 26, 27] qu'un tel système produit des sons dont la fréquence croît directement avec la pression d'alimentation. Il possède en outre plusieurs régimes de fonctionnement, et peut sauter de façon plus ou moins arbitraire de l'un à l'autre. Nous avons mesuré systématiquement les fréquences des sons produits par la partie (A) de la flûte à bec. Celle-ci était connectée à une bouteille d'air comprimé munie d'un détendeur. Les mesures effectuées pour des pressions comprises entre 100 et 900 Pa, reproduites dans la figure 5, sont semblables à celles qu'on obtient avec un système lame d'air/biseau habituel. Les points se placent sur les courbes des trois premiers modes hydrodynamiques. Bouasse les nomme "courbes buccales". On peut également analyser ces sons "buccaux" sous forme sonographique (figure 14, partie droite). Cette représentation présente plusieurs avantages pour notre propos : elle donne une indication de l'intensité, elle permet d'apprécier le contenu spectral et en particulier les bruits. Enfin elle permet une *comparaison immédiate* avec les analyses des sons transitoire. *Nous appellerons sons de biseau les sons produits par la partie (A) seule.*

Le transitoire d'attaque proprement dit de la flûte (A+B) correspond à la durée d'établissement d'un régime stable dans le tuyau. Les limites n'en sont pas toujours aisées à définir, mais il est d'usage de prendre le maximum d'amplitude du signal temporel comme fin du transitoire. Dans l'exemple de la figure 4a on peut estimer la durée du transitoire

welche nicht der Reihe der harmonischen Obertöne des Grundtones angehören und welche während des Ansprache-Einschwingvorganges der kompletten Flöte ( $\mathcal{A}+\mathcal{B}$ ) auftreten, werden Mundtöne genannt.

Durch Abbildung 4 wird es offensichtlich, dass das Spektrum der Mundtöne wesentlich komplexer als das Spektrum der nur von Teil ( $\mathcal{A}$ ) erzeugten Schneidentöne ist. Detaillierte Analyse zeigt, dass verschiedene Mundtöne *Differenztöne* sind. Große Aufmerksamkeit wurde darauf verwendet, sicherzustellen, dass dieses Phänomen weder künstlich durch das Mikrofon oder den Analysator noch durch Überlastung des Analysesystems entstanden ist. Die Differenztöne sind reproduzierbar und können durch verschiedene Analysetechniken<sup>3</sup> festgestellt werden. In Abbildung 4 ist der vorherrschende Mundton (MT) von Seitenbändern umgeben, welche unharmonisch sind: am auffallendsten sind die beiden wichtigsten Seitenbänder (MT+H1 und MT-H1), welche sobald in Erscheinung treten, als der Grundton der Flöte aufgebaut wird (siehe auch [28, 29] für weitere Beispiele). Obwohl im allgemeinen sehr kurzlebig, sind Differenztöne in den Fällen von herausragender Bedeutung, wo die Mundtöne während der gesamten Klangabstrahlung der Pfeife mitklingen. Solche Differenztöne, welche im allgemeinen als vom Orgelbauer zu behobende Fehler betrachtet werden, werden manchmal vorsätzlich aus musikalischen Gründen provoziert, wie man in Abschnitt 3.3 sehen wird, wenn das Register *Viola 4'* der italienischen Orgel analysiert wird.

Die bis hierher vorgestellten Experimente können beliebig mit verschiedenen Labialpfeifen reproduziert werden. Um es zu vermeiden, wertvolle Instrumente zu zerstören, kann man auch eine gut bekannte Technik nutzen, um die Reaktion der Pfeife auszuschalten. Die

3 Bei spektrografischen Analysen, welche mit analogen Analysatoren wie z.B. *Sona-Graph KAY electromics Modell 7029A* durchgeführt wurden, entstanden zusätzliche Kombinationstöne. Wurden beispielsweise zwei Töne gleichzeitig von einem Flötisten gespielt, welcher in zwei Mundstücke blies, zeigten sich zusätzlich zu den Obertönen verschiedene Kombinationstöne, welche denen ähneln, die im menschlichen Ohr entstehen. Diese Phänomene sind mit der digitalen Technik verschwunden und sind mit dem *Sona-Graph 5500* nicht mehr sichtbar. Man kann deshalb schließen, dass die während dem Ansprache-Einschwingvorgang entstehenden Kombinationstöne wirklich auf nicht-lineares Verhalten der Quelle selbst zurückzuführen sind.

pipe. Its time limits are not easy to define, but it is usual to take the amplitude maximum of the time signal as the end of the transient. In the example of Figure 4a, one can estimate the transient duration to be about 30 ms. Complete acoustical description must therefore take into account all phenomena that take place before the last harmonics have appeared. *Tones that do not belong to the harmonic series of the fundamental and take place during the attack transient of the whole recorder ( $\mathcal{A}+\mathcal{B}$ ) shall be called mouth tones.*

From Figure 4, it is obvious that the mouth tone spectrum is more complex than the edgetones spectrum of part ( $\mathcal{A}$ ) alone. Detailed analysis shows that several tones visible in the mouth tones are *difference tones*. Great care has been taken to check that it is not an artefact from the microphone or the analyser, nor due to overload in the analysis system. The difference tones are reproducible and can be observed with different analysis techniques<sup>3</sup>. In Figure 4, the main mouth tone (MT) is lined with side-bands which are not harmonics: most conspicuous are the two main side bands (MT+H1 and MT-H1) which appear as soon as the fundamental of the pipe is setting up (see [28, 29] for more examples). Though generally very short lived, difference tones are of paramount importance in cases where mouth tones keep on during the whole sound emission of the pipe. Such difference tones, generally considered as defects the organ builder should correct, are sometimes deliberately produced for musical purposes, as shall be seen in section 3.3, when analysing the *viola 4'* stop in the Italian organ

The experiments presented so far can be reproduced at will with different flue pipes. In order to avoid destroying valuable instruments, one can use a well known technique to cancel the pipe reaction. The technique sounds very simple, but really is quite tricky,

3 Digital signal analysis does not create combination tones as was common with former analog analysis. For example, when analysing the sound produced simultaneously by the same player, with two flutes, the *Sona-Graph KAY electromics 7029A* used to display combination tones similar to the one produced inside the human ear. Such combination tones are no longer visible on the digital *Sona-Graph DSP 5500*. However, combination tones produced by attack transient are still visible and must therefore correspond to non-linearities in the source itself.

à 30 ms. Sa description acoustique complète doit prendre en compte les phénomènes se produisant avant l'établissement des derniers harmoniques apparus. *Nous appellerons sons de bouche, les sons étrangers à la série harmonique du fondamental qui se produisent pendant le transitoire d'attaque de la flûte complète ( $\mathcal{A}+\mathcal{B}$ ).*

En nous reportant à la figure 4 on peut observer que le spectre des sons de bouche de cette flûte est plus complexe que celui de la partie ( $\mathcal{A}$ ) seule. Une analyse détaillée montre que plusieurs des sons apparaissant dans les sons de bouche sont des sons de *combinaison*... Nous avons pris bien soin de vérifier qu'il ne s'agit pas d'un artefact provenant du microphone ou de l'analyseur, ni d'une saturation dans la chaîne d'analyse. Les phénomènes sont reproductibles et observables avec différentes techniques d'analyse<sup>3</sup>. Sur la figure 4 le son principal (MT) est encadré de collatérales non harmoniques, parmi lesquelles on repère, durant le transitoire, les deux principales (MT+H1 et MT-H1) qui se manifestent dès l'établissement du fondamental du tuyau. La technique d'analyse temporo-spectrale que nous utilisons couramment nous a permis de rendre compte de ces phénomènes lors d'études antérieures [28, 29]. Les sons de combinaison, généralement très fugitifs, peuvent prendre une importance primordiale lorsque les sons de bouche se stabilisent durant toute l'émission sonore du tuyau. De tels phénomènes, considérés le plus souvent comme un défaut que le facteur tente de corriger, peuvent aussi être volontairement produits à des fins musicales; comme nous le verrons dans le paragraphe 3.3 lors de l'analyse du jeu de *viola 4'* de l'orgue Italien.

L'expérience que nous venons de présenter peut être reproduite à volonté avec différents tuyaux à bouche. Mais pour éviter de découper des instruments de

3 Les analyses spectrographiques réalisées avec du matériel analogique tel le *Sona-Graph KAY electromics modèle 7029A* pouvaient créer des sons de combinaison supplémentaires. Par exemple, deux sons joués simultanément par un seul flûtiste soufflant dans deux embouchures montraient, en plus des harmoniques, plusieurs sons additionnels et différentiels, similaires à ceux qui se produisent dans l'oreille humaine. Ces phénomènes ont disparu avec la technique numérique et ne sont plus visibles avec le *Sona-Graph 5500*. Par conséquent on peut affirmer que les sons de combinaison apparaissant pendant le transitoire d'attaque sont réellement dus à des non-linéarités de la source.



Technik klingt sehr einfach, doch ist sie in der Realität ziemlich heikel. Die Pfeife muss mit weichem Material gefüllt werden (Streifen von Leinen oder Baumwolle), um die in der Flöte auftretenden akustischen Vibrationen auszuschalten, ohne den Aufbau des Luftbandes zu behindern. Mit etwas Praxis kann diese Technik ausreichend gut gemeistert werden. Da sie reversibel ist, kann man ihre Reproduzierbarkeit jederzeit kontrollieren. Sie wurde auch bei der weiter oben beschriebenen kompletten Flöte ( $\mathcal{A}+\mathcal{B}$ ) angewendet, um die Möglichkeit zu testen, Schneidentöne zu erhalten, ohne das Instrument in zwei Teile zu schneiden.

Mit Bezug auf Abbildung 4 sagen wir aus, dass in Ansprache-Einschwingvorgängen auftretende Mundtöne in Beziehung zu den Schneidentönen stehen, welche vom losgelösten Mundstück allein hervorgebracht werden. Um die Diskussion zu bereichern, werden nun mehrere Experimente vorgestellt, bei welchen die vom Luftband/Labium-System allein hervorgebrachten Töne systematisch mit denjenigen verglichen werden, welche beim kompletten flötenähnlichen Instrument entstehen.

Übersetzung: Annett Jehmlich

because the pipe must be filled up with soft materials (strips of linen, or cotton wool) in order to absorb the acoustical vibrations that take place in it without perturbing the building up of the jet. With a bit of practice, the technique can be sufficiently well mastered and, since it is reversible, it is easy to check its reproducibility at any time. It has been used for the whole recorder ( $\mathcal{A}+\mathcal{B}$ ) studied above, in order to check the possibility of obtaining edge tones without cutting the instrument in two.

With reference to Figure 4, we postulate that mouth tones present in attack transients are related to edge tones produced by mouth pieces alone. In order to enrich the discussion, several experiments are now presented where tones produced by the air-jet/labium alone are systematically compared to tones produced by the whole flue-like instrument.

Translation: Jean-Dominique Polack

To be continued in ISO Journal N°11.

valeur on pourra utiliser une technique connue pour "annuler" l'effet du tuyau. L'opération est simple dans son principe mais délicate en pratique car il faut remplir le tuyau d'un matériau mou (bande de tissu ou coton) pour absorber les vibrations acoustiques qui s'y produisent, sans perturber la production du jet. Avec un peu d'habitude on maîtrise bien cette technique, et comme elle est réversible on peut à tout instant s'assurer de sa reproductibilité. Nous avons d'ailleurs appliqué cette technique à la flûte entière ( $\mathcal{A}+\mathcal{B}$ ) étudiée ci-dessus, pour vérifier qu'on pouvait retrouver le son de biseau sans découper l'instrument.

En nous référant à la figure 4 nous poserons comme hypothèse que les sons de bouche présents dans le transitoire d'attaque ont "quelque chose à voir" avec les sons de biseau produits par l'embouchure seule. Pour argumenter la discussion que nous développerons en fin de ce travail nous présentons maintenant plusieurs expériences au cours desquelles nous effectuerons la comparaison systématique entre les sons produits par le système lame d'air biseau isolé et ceux de l'instrument à embouchure de flûte dans son entier.

Michèle Castellengo

Vous pouvez lire la suite de cet article dans ISO Journal N°11.

#### Bibliography / Bücherverzeichnis / Références Bibliographiques

- 1 Jones A. T. (1939) *Recent investigations of organ pipes*, J.A.S.A. **11**, 122-128
- 2 Tröndelenburg F., Thierhaus E., Franz E. (1936) *Klangensätze an der Orgel* (The onset of sound in an organ), *Akustische Zeitschrift* **1**, 59-76 and **3/7** (1938) and **5**, 309 (1940)
- 3 Meeroer D. M. A. (1959) *The tone quality of organ flue pipes and its dependence on voicing adjustments*, Ph.D. Thesis, London
- 4 Rakowski A., Richardson E. G. (1960) *Eine Analyse des Intonationsvorganges beim Orgeln*, *Gravesaner Blätter IV* (15-16), Experimental Studio, Gravesano (Suisse), 46-53
- 5 Keefer J. S. (1972) *The attack transients of organ pipes*, *IEEE Trans. AU* **20** p. 378
- 6 Angster J., Miklos A. (1989) *New developments on the understanding of the buildup of organ sounds*, C.R. 13th ICA, Belgrade, **3**, 99-102
- 7 Angster J., Angster J., Miklos A. (1991) *Über die Messungen während des Intonationsprozesses bei Lippenspielen der Orgel*, *Instrumentenbau Zeitschrift*, **7/8**, p/1-76
- 8 Angster J., Miklos A. (1992) *Transient sound spectra of a variable length organ pipe*, *International Symposium on Musical Acoustics*, Tokyo, 159-162
- 9 Angster J., Paal G., Garen W., Miklos A. (1997) *Effect of voicing steps on the stationary spectrum and attack transient of a flue organ pipe*, *Proc. of the International Symposium on Musical Acoustics*, Edinburgh, 285-294
- 10 Fletcher N. H. (1976) *Transients in the Speech of Organ Flue Pipes—A theoretical study*, *Acustica* **34**, 224-233
- 11 Fletcher N. H. (1976) *Sound production by organ flue pipes*, *J.A.S.A.*, **60**, 926-936
- 12 Nolle A. W., Boner C. P. (1941) *The initial transients of organ pipes*, *J.A.S.A.*, **13**, 149-155
- 13 Nolle A. W. (1979) *Some voicing adjustments of flue organ pipes*, *J.A.S.A.*, **66**, 1612-1626
- 14 Nolle A. W., Finch T. L. (1992) *Starting transients of flue organ pipes in relation to pressure rise time*, *J.A.S.A.*, **91**, 2190-2202
- 15 Verge M. P., Fabre B., Mahu W., Hirschberg A., van Hassel R., Wijnands A., de Vries J., Hogendoorn C. (1994) *Jet formation and jet velocity fluctuations in a flue organ pipe*, *J.A.S.A.*, **95**, 1119-1132
- 16 Verge M. P., Fabre B., Hirschberg A., Wijnands P. (1997) *Sound production in recorderlike instruments. I. Dimensionless amplitude of the internal acoustic field*, *J.A.S.A.*, **101**, pp 2914-2924
- 17 Verge M. P., Hirschberg A., Caillès R. (1997) *Sound production in recorderlike instruments. Part II. A simulation model*, *J.A.S.A.*, **101** (5) pp 2925-2939
- 18 Powell A. (1961) *On the edgetone*, *J.A.S.A.*, **33**, 395-409
- 19 Yoshikawa S., Saneyoshi J. (1980) *Feedback excitation mechanism in organ pipes*, *J. Acoust. Soc. Japn* (E) **1**, pp175-191
- 20 Mahu W., Peters M., Verge M. P. et al. (1992) *Attack transients of a flue organ pipe*, 2nd Dutch Conference on Mechanics
- 21 Verge M. P., Schoffelen R., Wijnands A., Hirschberg A., Box C. (1997) *Acoustic behavior of chimney pipes*, ISMA 97, Edinburgh
- 22 Leipp E. (1968) *Quelques méthodes et problèmes de l'acoustique*, *Annales de l'Université de Paris* **2**, p.233-245
- 23 Winckel F. (1960) *Vues nouvelles sur le monde des sons*, French translation of "Klangwelt unter der Lupe", M.Hesses Veri.Berlin, 1952
- 24 Castellengo M. (1976) *Contribution à l'étude expérimentale des tuyaux à bouche*, Thèse, Université de Paris VI
- 25 Carrière Z. (1926) *Harmoniques supérieures des tuyaux à bouche de flûte, par vent très faible*, *Journal de Physique et le Radium*, Paris, p.7-12
- 26 Bouasse H. (1929) *Instruments à vent*, T.1, 897, Delagrave Paris
- 27 Blake W. K., Powell A. (1983) *The development of contemporary views of flow-tone generation*, in *Recent advances in aeroacoustics*; Springer Verlag ed., New York
- 28 Castellengo M. (1974) *Spectrographie des transitoires d'attaque des tuyaux à embouchure de flûte*, 8<sup>th</sup> ICA Londres
- 29 Castellengo M. (1996) *The role of mouth-tones in the constitution of attack transients of mouth pipes*, C.R. Forum Acusticum, Antwerpen

# ISO Journal

ISSN 1017-7515

The Magazine of the International Society of Organbuilders



- *ISO Congress 2002: Organ Building in Norway until the 19<sup>th</sup> Century*
- *Organ design: Acoustics of the Organ Case*
- *Analyse acoustique du transitoire des tuyaux à bouche*

Number 11

July 2001

Deutsch — Français — English

# Analyse acoustique du transitoire d'attaque des tuyaux a bouche Sons de bouche et sons de biseau (2° partie)

Michèle Castellengo

Dieser Artikel erschien in Englisch in *Acustica united with Acta Acustica* (Nr. 3, Mai/Juni 1999) und wird hier mit der freundlichen Zustimmung von S. Hirzel Verlag abgedruckt. Der erste Teil erschien *ISO Journal* Nr. 10, März 2001

## Akustische Analyse von Einschwingvorgängen bei flöten- ähnlichen Instrumenten: *Mundtöne und Schneidentöne (2. Teil)*

### 3 Experimentelle Ergebnisse

#### 3.1 Veränderungen der Mundtöne des Einschwingvorganges durch Veränderung des statischen Druckes

Eine zweite Orgelpfeife durchschnittlicher Größe (*Tabelle 1, Pfeife Nr. 2*) wird nun auf die Versuchsortung gestellt. Der Druck der Windversorgung, welcher in der Tonkammer gemessen wird, erhält die drei folgenden Werte: 26, 45 und 67 mm Wassersäule (dies entspricht 255, 441, und 657 Pa). Für jeden statischen Druckwert werden die nur vom Pfeifenmund erzeugten Töne (wobei die Pfeife mit absorbierendem Material gefüllt ist) und die Töne der kompletten Pfeife nacheinander aufgenommen. Das Ventil der Windkammer wird auf reproduzierbare Art und Weise geöffnet. Die spektrografische Analyse der so erhaltenen Töne wird in *Abbildung 6* gezeigt, wo für die drei unterschiedlichen Druckwerte jeweils der vom separaten Mundstück (MT) und der von der kompletten Pfeife (P) erzeugte Ton nebeneinander dargestellt sind. Betrachten sie zuerst die im Pfeifenklang enthaltenen Obertöne bei der kompletten Pfeife, wenn der Druck erhöht wird: die Töne werden voller und intensiver, die Amplitude des 1. Obertones nimmt zu und bei  $P = 657$  Pa überbläst die Pfeife beinahe. Andererseits enthalten Ansprache-Einschwingvorgänge Mundtöne, bei denen die Komplexität der Frequenzen und des Spektrums bei steigendem Druck zunehmen. Wenn man die Mundtöne, welche bei den

This paper, first published in English in *Acustica united with Acta Acustica* (No. 3, May/June 1999) appears here with the kind permission of S. Hirzel Verlag. The first part is published in *ISO Journal* No. 10 of March 2001

## Acoustical analysis of initial transients in flute like instruments: *Mouth sounds and edge tones (2nd part)*

### 3 Experimental results

#### 3.1 Variation of transient mouth tones with static pressure.

A second organ pipe of average scale (*Table 1, Pipe No. 2*) is now set on the small organ. The supply pressure measured in the note channel is set at three different values: 26, 45 and 67 mm of water (respectively 255, 441, and 657 Pa). For each static pressure, the tones produced by the mouth only (pipe filled up with absorbing material), and the tones from the normal pipe are successively recorded. The channel pallet is triggered in a reproducible fashion. Spectrographic analysis of the tones thus obtained are given in *Figure 6* where are presented side by side the tone from the mouthpiece alone (MT) and the tone from the full pipe (P) for all three supply pressures. Look first at the harmonic content of the pipe tones when pressure increases: the tones become fuller and more intense, the amplitude of the second harmonic increases, and for  $P = 657$  Pa the pipe is nearly overblowing. Attack transients on the other hand contain mouth tones with frequencies and spectral complexities increasing with pressure. When comparing the mouth tones present in the pipe transients with the corresponding edge tones for each pressure value, one notices some similarities. In particular, the frequency of the most prominent mouth tone, (2300 Hz for the pipe P1, 3000 Hz for P2 and 3800 Hz for P3) corresponds to the fundamental of

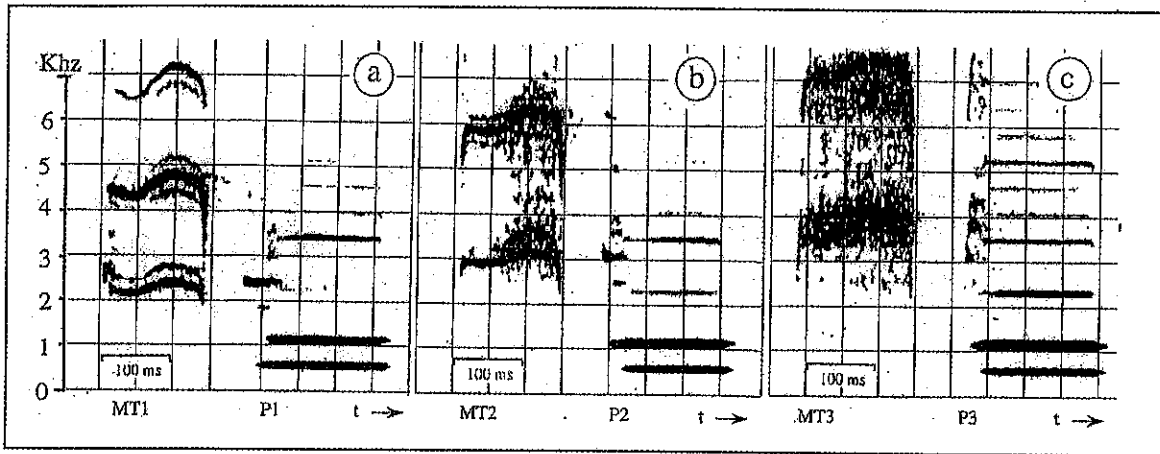
Ce papier, paru en anglais dans *Acustica united with Acta Acustica* (N°3, Mai/Juin 1999), est publié ici avec l'aimable concours de l'éditeur S. Hirzel Verlag. La première partie est paru dans *ISO Journal* N°10 de Mars 2001

### 3 Résultats expérimentaux

#### 3.1 Variation des sons de bouche du transitoire avec la pression statique

Prenons un deuxième tuyau d'orgue de taille moyenne (*Tableau 1, tuyau N°2*) que nous posons sur le mannequin d'orgue. La pression d'alimentation, mesurée dans la gravure, est réglée selon trois valeurs 26, 45 et 67 mm d'eau (2,55; 4,41; 6,57 mBar). Pour chaque valeur de la pression statique, on enregistre successivement le son produit par la bouche seule (tuyau rempli d'absorbant) puis le son du tuyau normal. La soupape de gravure est actionnée de façon reproductible. L'analyse spectrographique des sons obtenus pour chaque réglage de la pression est donnée dans la *Figure 6* où l'on a représenté côte à côte le son de la bouche seule (MT) et le son du tuyau complet (P). Observons tout d'abord le contenu harmonique du son du tuyau (P). Avec l'augmentation de pression, le son s'enrichit, devient plus intense, l'harmonique 2 croît en amplitude et pour  $P = 6,57$  mBar le tuyau est prêt d'octavier. L'analyse montre, au transitoire d'attaque, des sons de bouche dont la fréquence et la complexité spectrale croissent avec l'augmentation de pression. En comparant les sons de bouche présents dans le transitoire du tuyau (P) et les sons de biseau (MT) enregistrés pour chaque valeur de P on constate des analogies évidentes. En particulier, la fréquence du son de bouche dominant du tuyau, 2300 Hz pour P1, 3000 Hz pour P2 et 3800 Hz pour P3 correspond à la composante fondamentale de chacun des sons produits par la bouche seule.

Connaissant l'extrême sensibilité des sons de biseau aux variations de pres-



**Figure 6**

Organ pipe No. 2, comparison between sounds produced by the mouth alone (MT) and sounds produced by the whole pipe (P) for three different supply pressures: a)  $P = 255$  Pa; b)  $P = 657$  Pa; c)  $P = 657$  Pa. Time scale: 50 ms per division. The inharmonic frequencies that are temporarily present in the attack transient of the whole pipe correspond to those of the mouth sound alone.

Transitoire du tuyau d'orgue N°2 enregistré pour trois pressions d'alimentation différentes: a)  $P = 255$  Pa; b)  $P = 657$  Pa; c)  $P = 657$  Pa. Echelle du temps: 50 ms par division. Pour chaque valeur de la pression on compare l'analyse spectrale du son de bouche isolé (MT) et celle du tuyau complet (P). Les fréquences inharmoniques présentes de façon fugitive dans le transitoire d'attaque du tuyau complet correspondent à celle du son de biseau isolé.

Orgelpfeife Nr. 2. Vergleich zwischen den Klängen, welche bei drei unterschiedlichen Winddrücken zum einen beim separaten Mundstück (MT) und zum anderen bei der kompletten Pfeife (P) entstehen: a)  $P = 255$  Pa; b)  $P = 441$  Pa; c)  $P = 657$  Pa. Zeitskala: 50 ms per Teilstrich. Die unharmonischen Frequenzen, die kurzzeitig im Ansprache-Einschwingvorgang der kompletten Pfeife erscheinen, entsprechen denen beim separaten Mundstück.

Einschwingvorgängen der Pfeife vorhanden sind mit den Schneidentönen für jeden Druckwert vergleicht, kann man einige Ähnlichkeiten feststellen. Vor allem ist zu sehen, dass die Frequenz des dominantesten Mundtones (2300 Hz für Pfeife P1, 3000 Hz für P2 und 3800 Hz für P3) dem Fundamentton des vom separaten Mundstück erzeugten Klanges entspricht.

Da die Schneidentöne extrem sensibel auf Druckvariationen reagieren, müssen die in Abbildung 6 erkennbaren Frequenzvariationen erklärt werden. In Abbildung 7 sieht man auf der linken Seite den stabilen Zustand des vom

each of the tones produced by the mouthpiece alone.

Since edge tones are extremely sensitive to pressure variations, the frequency variations visible on Figure 6 need to be explained. Figure 7 presents on the left, the steady state part of the sound produced by the mouthpiece alone (Pipe No. 1) under constant supply pressure (255 Pa) delivered by a compressed air container through a regulator, and on the right, the same sound produced by the experimental organ taken from Figure 6a. It is clear that the frequency variations of the mouth tones in Figure 6 are due to small pressure

sion, nous devons expliquer les variations de fréquence visibles sur la Figure 6. Comparons tout d'abord sur la Figure 7 à gauche la partie stationnaire du son produit par la bouche seule alimentée à pression constante (2,55 mBar) par une bouteille d'air comprimé munie d'un détendeur, puis à droite par le système de l'orgue. Les oscillations de fréquences observables dans la partie stationnaire des sons de bouche (MT) de la Figure 6 sont dues aux petites fluctuations de pression (de l'ordre de 0,3 mBar) se produisant dans le sommier de notre dispositif expérimental. Après l'ouverture de la soupape se produit une brève baisse

**Table 1 Measurements in mm**

Organ pipe	N°1	N°2
Material	Metal	Metal
Internal diameter	$D = 28$	$D = 26$
Pipe length	$L = 291$	$L = 225,5$
Scale	$L/D = 10$ Principal	$L/D = 9$ Principal
Wall thickness	0,6	0,7
Foot length	219	180
Mouth dimensions	$1 \times h = 20,5 \times 5$	$1 \times h = 20 \times 4$
Flue width	$< 0,5$	$< 0,5$

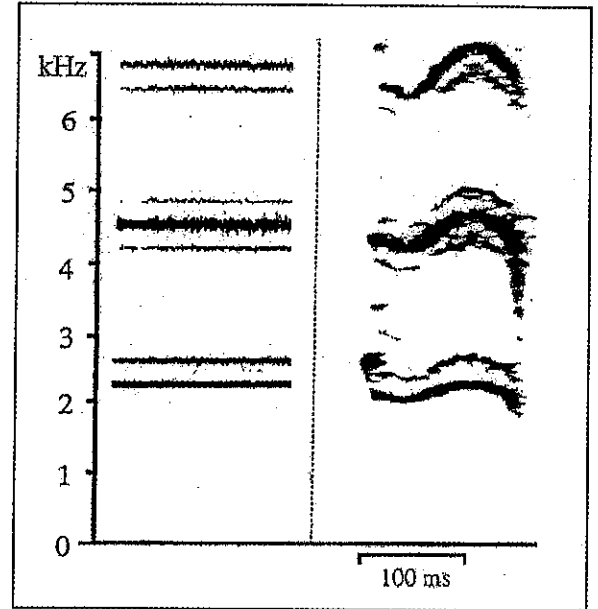
Alto recorder	N°1	N°2
Material	Plastic	Wood
Trade mark	Rainma	Aura baroque system
Internal $\sigma$ of the mouthpiece	$D = 18,2$	$D = 17,5$
Wall thickness of the mouthpiece	7	—
Mouth dimensions	$1 \times h = 12 \times 4$	$1 \times h = 11 \times 4$
Duct length	59	55
Input section of duct	$12 \times 2$	$12,8 \times 2,2$
Output section of duct	$12 \times 0,75$ (flue exit)	$11 \times 0,85$ (flue exit)

**Figure 7**

Organ pipe No. 1. Time/frequency analysis of sounds produced by the mouth disconnected from the pipe.  $P = 255 \text{ Pa}$ . Left: compressed air from a container, directly connected to the foot of the pipe; right: compressed air from the windchest, through note channel and pallet. Notice the sensitivity of the mouth tone frequencies to small pressure variations in the note channel.

Tuyau d'orgue N°1. Analyse sonographique du son produit par la bouche seule.  $P = 255 \text{ Pa}$ . Partie gauche; air fourni par une bouteille d'air comprimé. Partie droite: conditions ordinaire d'alimentation sur un sommier d'orgue. On remarque la sensibilité du son de bouche aux variations de pression se produisant dans la gravure après l'ouverture de la soupape.

Orgelpfeife Nr. 1. Zeit/Frequenz-Analyse der Klänge, welche am separaten Mundstück entstehen.  $P = 255 \text{ Pa}$ . Links: mit Druckluft, welche aus einem Behälter zugeführt wird, der direkt mit dem Pfeifenfuß verbunden ist; Rechts: mit Druckluft, welche aus der Windlade stammt und durch Tonkanzelle und Ventil geleitet wurde. Beachten Sie die Sensibilität der Mundtonfrequenzen für kleine Druckvariationen in der Tonkanzelle.



separaten Mundstück erzeugten Klanges (Pfeife Nr. 1) bei konstantem Winddruck (255 Pa), welcher von einem mit einer Reguliervorrichtung versehenen Pressluftbehälter erzeugt wird. Auf der rechten Seite sieht man eine Abbildung des Klanges derselben Pfeife, welcher auf der Experimentierorgel entsteht (übertragen aus Abbildung 6a). Es ist eindeutig, dass die in Abbildung 6 sichtbaren Frequenzvariationen der Mundtöne von kleinen Druckschwankungen hervorgerufen werden, (ca. 30 Pa), welche in der Windlade der Experimentierorgel entstehen. Wird das Ventil geöffnet, fällt der Druck leicht ab und die Tonkanzelle, welche ein Masse/Feder-System mit einem Freiheitsgrad darstellt, wird in Schwingungen versetzt. Schwingungen dieser Art sind systematisch untersucht worden [30,31]. Obwohl diese mit niedriger Amplitude Schwingungen (ca. 10% des Druckwertes) nur einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Grundtonfrequenz der Pfeife im stabilen Klangzustand ausüben, verändern sie die

oscillations, produced in the chest of the experimental organ (about 30 Pa). When the pallet opens, the pressure falls slightly, and the note channel, a mass/spring system with one degree of freedom, is set into oscillations. Such oscillations have been systematically studied [30,31]. Although these low amplitude oscillations (about 10% of the pressure value) have negligible influence on the steady state fundamental frequency of the pipe, they considerably alter the frequencies of edge tones, especially in the case of repeated notes. Moreover, in Figure 6, and more precisely in tones MT1 and MT2, glissandi take place when the pallet is closing, and in tone MT3, two initial ascending glissandi can also be seen in the transient mouth tone P3. These variations follow the rise and fall of pressure in the pipe foot when the pallet is moving.

We hope that the reader is now convinced of the extreme spectral complexity of the sounds produced by the mouthpiece of this organ pipe. Many components are present, some of which

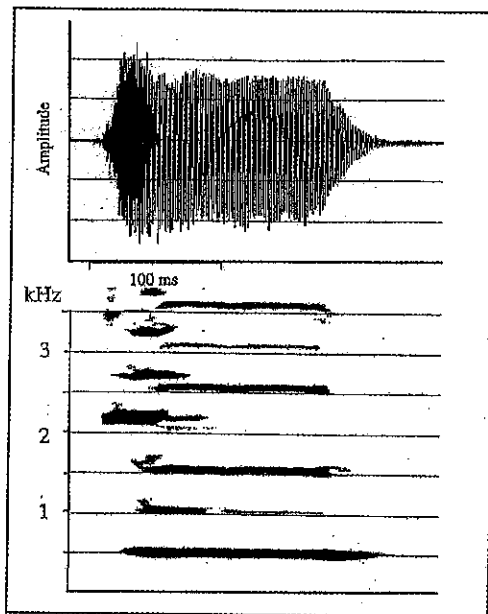
de pression, immédiatement compensée par une oscillation en sens inverse. De telles fluctuations, observables sur toutes sortes de dispositifs mécaniques, ont fait l'objet d'études systématiques [30,31]. Remarquons que des oscillations de faible amplitude (de l'ordre de 10% de la pression) ayant une incidence négligeable sur la fréquence fondamentale du régime permanent du tuyau, peuvent au contraire modifier de façon importante les fréquences du son de biseau, par exemple lors de notes répétées. Dans la Figure 6 on décèle également sur les analyses de MT1 et MT2 les glissandos descendants se produisant à la fermeture de la soupape, et sur le son MT3 deux glissandos ascendants initiaux, visibles également dans le son de bouche du transitoire de P3. Ces variations suivent l'établissement puis la chute de la pression dans le pied du tuyau lors de l'action de la soupape.

On aura pu remarquer l'extrême complexité du spectre des sons produits par la bouche isolée de ce tuyau d'orgue. De nombreuses composantes sont présentes,

**Table 2**

Frequencies of mouth tones and resonant modes for Organ pipe No. 1  
Fréquences des sons de bouche et des modes de résonance pour le tuyau N° 1  
Frequenzen der Mundtöne und Resonanzschwingungen für die Pfeife Nr. 1

Rank order	1	2	3	4	5	6
Harmonic series	513	1026	1539	2052	2570	3080
Resonant modes (sinus excitation)	504,5	1044	1576	2180	2700	3270
Resonant modes (noise excitation)	515	1050	1580	2140	2720	
Mouth tones				2170	2710	3250



**Figure 8**

Organ pipe No. 1, attack transient analysis. From top to bottom: waveform and time/frequency analysis.

Tuyau d'orgue N° 1, analyse du transitoire d'attaque. De haut en bas, signal temporel et analyse temps/fréquence.

Orgelpfeife Nr. 1. Orgelpfeife Nr. 1, Ansprache-Einschwingvorgang. Von oben nach unten: Wellenform und Zeit/Frequenz-Analyse.

Frequenzen der Schneidentöne, vor allem bei Repetitionen, erheblich. Darüber hinaus wird in Abbildung 6, vor allem bei den Tönen MT1 und MT2 sichtbar, dass Glissandi stattfinden, wenn das Ventil schließt. Beim Ton MT3 können beim Mundton P3 des Einschwingvorganges auch zwei aufsteigende Glissandi beobachtet werden. Diese Variationen sind die Folge von Druckaufbau und Druckabbau im Pfeifenfuß bei den Ventilbewegungen.

Wir hoffen, dass der Leser nun von der extremen Komplexität des Klangspektrums, welches am Mundstück dieser Orgelpfeife entsteht, überzeugt ist. Es sind viele Komponenten vorhanden, von denen einige unharmonisch sind. Die Erfahrung hat gezeigt, dass dies bei allen Metall-Orgelpfeifen vorkommt, bei denen die Geometrie des Pfeifenmundes markant von derjenigen von Holzpfeifen abweicht. Für Metall-Orgelpfeifen, die der vorliegenden ähnlich sind, wurde die Rolle, welche die Resonanz des Pfeifenfußes für das vom separaten Mundstück erzeugte Klangspektrum spielt, an anderer Stelle nachgewiesen [24].

Experimente, welche der vorliegenden mit Orgelpfeife Nr. 2 ähnlich sind, wurden in unserem Labor mit Pfeifen verschiedener Größen und Mensuren vielfach wiederholt. An dieser Stelle muss auf folgende zwei Beobachtungen hingewiesen werden:

- 1 die Existenz von Mundtönen, deren Frequenzvariationen von Parametern des Pfeifenmundes beeinflusst werden;

are inharmonic. Experience has proved this to happen in organs for all metal pipes, with a mouth geometry markedly different from that of wood pipes. For metal organ pipes like the present one, the role played by the resonances of the foot cavity in the spectra of the sounds produced by the mouthpiece only has been demonstrated elsewhere [24].

Experiments similar to the present one with organ pipe No. 2, have been reproduced many times in our laboratory with pipes of different scales and dimensions. At this point two observations need to be emphasized, namely

- 1 the existence of mouth tones with frequency variations controlled by mouth parameters;
- 2 the one to one correspondence between edge tones and mouth tones.

The last observation suggests a functioning of the exciting system that may seem paradoxical, but only because the time domain approach to musical acoustics, unlike room acoustics: during the transients, the mouth first speaks in a quasi-self sustained way; then, later on, the pipe starts reacting. This will now be shown in detail.

### 3.2 Influence of pipe *eigenmodes* on mouth tones during attack transient

In his analysis of transients of

dont certaines inharmoniques. Selon notre expérience, ce caractère est commun aux tuyaux d'orgue en étain dont la géométrie de la bouche est différente de celle des tuyaux d'orgue en bois. Nous avons montré par ailleurs [24] le rôle joué par les résonances de la cavité du pied dans le spectre des sons produits par la bouche isolée d'un tuyau d'orgue d'étain analogue à celui-ci.

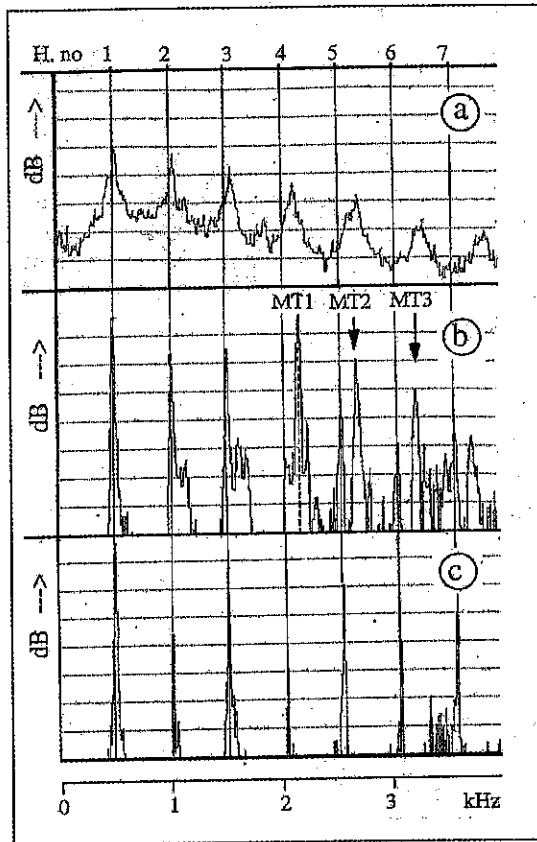
L'expérience que nous venons d'analyser avec le tuyau d'orgue N°2 a été reproduite un grand nombre de fois au laboratoire, avec des tuyaux de taille et de dimensions différentes. A cette étape de notre exposé, deux points nous semblent important à souligner

- 1 d'une part l'existence de sons de bouche dont la variabilité en fréquence est contrôlée par les paramètres de la bouche ;
- 2 d'autre part la correspondance entre les sons de biseau et les sons de bouche.

Ce point suggère un comportement du système excitateur qui peut sembler paradoxal puisque, lors du transitoire, la bouche fonctionnerait de façon quasi-autonome, le tuyau n'intervenant qu'en second lieu comme on pourra le voir dans l'expérience suivante.

### 3.2 Incidence des modes propres du tuyau sur les sons de bouche du transitoire d'attaque

Dans l'analyse du transitoire du tuyau d'orgue bouché, Jones indique que



**Figure 9**

Organ pipe No. 1, spectra. Linear frequencies, 0-4000 Hz; horizontal lines 9 dB apart. Vertical lines indicate the harmonics of the steady state regime (fundamental frequency = 513 Hz).

- a Noise excitation, average spectrum displaying the passive resonances of the pipe.
- b Attack transient spectrum computed over time window A-B in Figure 8. Mouth tone frequencies (MT) are not harmonics, but correspond to the passive resonances of the pipe.
- c Steady state spectrum.

Tuyau d'orgue N°1. Spectre dB (9 dB par carreau), Hz (échelle linéaire 0-4000 Hz). Les traits verticaux indiquent les harmoniques du régime stationnaire ( $F = 513$  Hz).

- a Tuyau excité par un bruit continu: les fréquences du spectre sont celles des modes propres.
- b Spectre des composantes du transitoire d'attaque, premiers harmoniques et sons de bouche. On voit clairement que les fréquences des sons de bouche (MT) sont en dehors de la série harmonique et correspondent à celles des modes propres du tuyau.
- c Spectre des harmoniques de la partie stationnaire du son du tuyau.

Orgelpfeife Nr. 1, Spektren. Lineare Frequenzabstände von 0-4000 Hz; horizontale Linien: 9 dB Abstand pro Linie. Die vertikalen Linien präsentieren die Obertöne des stabilen Klangzustandes. (Frequenz des Grundtones = 513 Hz)

- a Anregung der Pfeife durch Rauschen: das Durchschnitts-Spektrum zeigt die Eigenschwingungen der Pfeife.
- b Spektrum des Ansprache-Einschwingvorganges, welches für das in Abbildung 8 gezeigte Zeitfenster A-B berechnet wurde. Man erkennt deutlich, dass die Mundtonfrequenzen (MT) keine Obertöne sind sondern den Eigenschwingungen der Pfeife entsprechen.
- c Spektrum des stabilen Klangzustandes.

2 die Eins zu Eins-Entsprechung von Schneidentönen und Mundtönen.

Die letztere Beobachtung legt die Funktionsweise eines Erregungs-Systems nahe, welches deshalb paradox erscheinen kann, weil die zeitliche Analyse zur Untersuchung von Einschwingvorgängen in der musikalischen Akustik, im Gegensatz zur Raumakustik, im allgemeinen nicht akzeptiert wird: während des Einschwingvorganges spricht zuerst der Pfeifenmund in quasi-autonomer Weise und später beginnt dann die Pfeife zu reagieren. Dies wird jetzt im Detail gezeigt.

### 3.2 Der Einfluss der

Eigenschwingungen einer Pfeife auf die Mundtöne während des Einschwingvorganges

Bei seiner Analyse der Einschwingvorgänge von gedeckten Orgelpfeifen weist Jones darauf hin, dass der "Vorläufer" ein Ton ist, welcher nicht der harmonischen Obertonreihe der Pfeifen angehört und welcher ungefähr fünfeinhalb Mal der Frequenz des Grundtones entspricht [1]. Die vorhergehende Analyse (Abbildung 6)

stopped organ pipes, Jones indicates that the "forerunner" is a tone that does not belong to the harmonic series of the pipe, and which has a frequency roughly  $5\frac{1}{2}$  times the fundamental frequency [1]. The preceding analysis (Figure 6) also showed the inharmonicity of mouth tones. In the many transients of organ pipes and recorders we have analysed [24], the dominant frequencies of the mouth tones were always very close to the eigenmodes of the pipes. The following experience specifies the later observation.

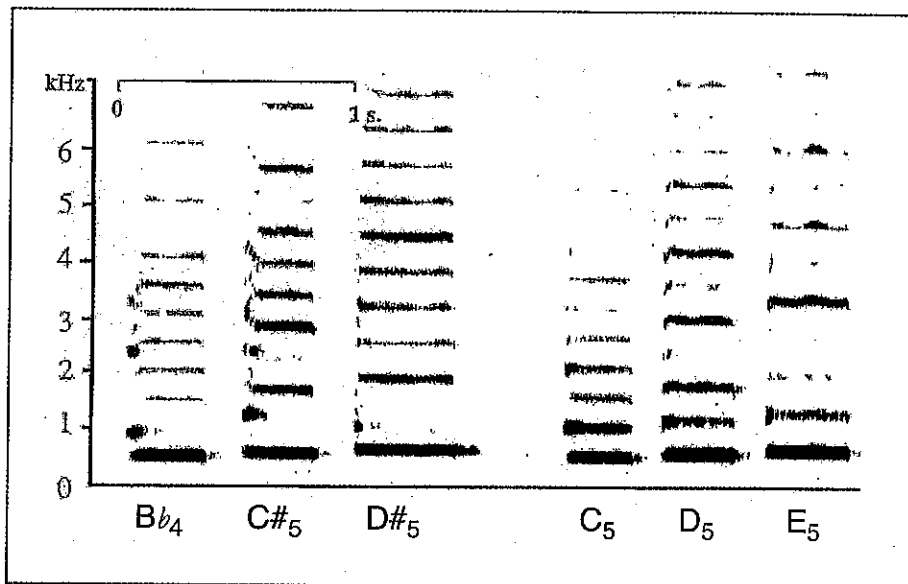
Figure 8 shows a tone produced with pipe No. 1 (fundamental frequency 513 Hz, see Table 1): waveform in the upper part and time/frequency display in the lower part. The first sound in the transient, also called "forerunner", has a frequency of 2170 Hz, slightly above the 4<sup>th</sup> harmonic of the pipe (2052 Hz). Notice, as often is the case, that the harmonic closest to the most prominent mouth tone has a low intensity.

Figure 9 presents three spectra, still pertaining to pipe No. 1. The vertical harmonic grid used for frequency reference is taken from Figure 9c, that is, from the steady state part of the sound,

le "précurseur" est un son étranger à la série harmonique du tuyau qui a pour fréquence environ 5 fois et demie la fréquence du fondamental [1]. L'analyse précédente (Figure 6) permet également d'observer l'inharmonicité des sons de bouche. Au cours des nombreuses analyses de transitoires que nous avons effectuées [24] qu'il s'agisse de tuyaux d'orgue ou de flûtes à bec, nous avons pu constater que les fréquences dominantes des sons de bouche étaient très voisines de celles des modes propres du tuyau. L'expérience suivante va permettre de préciser ce point.

La Figure 8 montre l'analyse acoustique : signal temporel et spectre temps/fréquence d'un son produit avec le tuyau N°1 dont le fondamental est 513 Hz. (Tableau 1). Le premier son, "précurseur" du transitoire, de fréquence 2170 Hz, est plus aigu que l'harmonique 4 du tuyau 2052 Hz. On remarquera, ce qui est d'observation fréquente, que l'harmonique voisin du son de bouche prédominant est d'intensité faible.

Pour préciser l'analyse nous avons réalisé trois types de spectres présentés dans la Figure 9. La grille verticale harmonique, qui sert de référence pour la



**Figure 10**

Alto recorder No. 2 "Aura". Time/frequency analysis of staccato notes:

a fork fingerings B $\flat$ , C $\sharp$ , D $\sharp$

b regular fingerings C, D, E. Mouth tones are more numerous and stronger for fork fingerings.

Flûte à bec N° 2 "Aura". Analyse sonographique de sons joués détachés.

a sons produits par des doigtés de "fourche" (Sib, Do $\sharp$ , Ré $\sharp$ )

b sons de la gamme diatonique (Do, Ré, Mi). Les sons de bouche sont plus nombreux et plus importants pour les sons de fourche.

Altblockflöte Nr. 2 "Aura". Zeit/Frequenz-Analyse von Tönen, welche staccato gespielt wurden.

a Fingersätze mit Gabelgriff B, C $\sharp$ , D $\sharp$ ;

b Fingersätze ohne Gabelgriff C, D, E. Bei den Fingersätzen mit Gabelgriff sind die Mundtöne zahlreicher und stärker ausgeprägt.

zeigte auch, dass die Mundtöne unharmonisch sind. Bei den zahlreichen, von uns analysierten Einschwingvorgängen von Orgelpfeifen und Blockflöten [24], waren die vorherrschenden Frequenzen der Mundtöne den Eigenschwingungen der Pfeife immer sehr nahe. Das folgende Experiment liefert genauere Angaben zu der letztgenannten Beobachtung.

Die Abbildung 8 zeigt einen Ton, welcher mit Pfeife Nr. 1 erzeugt wurde (Grundtonfrequenz: 513 Hz, siehe Tabelle.1): Wellenform im oberen Teil, und Zeit/Frequenz-Darstellung im unteren Teil. Der erste Klang des Einschwingvorganges, welcher auch als "Vorläufer" bezeichnet wird, hat eine Frequenz von 2170 Hz, welche leicht oberhalb des 4. Obertones der Pfeife (2052 Hz) liegt. Beachten sie, dass hier wie so oft der Oberton, welcher sich am nächsten zum ausgeprägtesten Mundton befindet, nur über eine geringe Intensität verfügt.

Die Abbildung 9 zeigt drei Spektren, welche alle noch zur Pfeife Nr. 1 gehören. Das vertikale Raster der Obertöne, welches für die Frequenz-Bestimmung genutzt wird, wurde von Abbildung 9c übernommen, wo der stabile Klangzustand der Pfeife 120 ms nach dem Beginn des Klanges wiedergegeben wird. Die Eigenschwingungen der Pfeife wurden mittels der Erregung durch ein weißes Rauschen gemessen, wobei das

120 ms after the onset. The eigenmodes are measured with white noise excitation, averaging the spectrum over a long time (1 second) (Figure 9a). A second resonance measurement with sinusoidal excitation gave very similar results. Spectrum 9b is computed over the first 100ms of the attack transient (segment indicated in Figure 8). It therefore displays both the harmonics of the building up sound and the mouth tones components. Clearly, mouth tones M1, M2 and M3 are very close to modes 4, 5 and 6 of the pipe respectively. Numerical values are given in Table 2. Increasing the damping of the eigenmodes of the pipe, for example by covering the internal wall of the tube with an absorbing material without changing the mouth, only attenuates the mouth tones but does not change their frequency contents [24].

On a recorder or a one-keyed flute, tones produced with fork fingering are especially rich in mouth tones. Due to modal inharmonicity, the steady state tones are lacking in harmonics, but the attacks present mouth tones much more intense and more stable than those obtained for fingerings without forks. Figure 10 compares attack transients for forking tones (left), to those for regular fingerings (right): the former contain more developed mouth tones. The instrument is an alto recorder played with "Te" type attack. It can easily be

lecture des fréquences provient du spectre 9c analysé dans la partie stationnaire du tuyau, 120 ms après le début du son. Pour obtenir les modes propres le tuyau à bouche a été excité de façon entretenue par un bruit blanc. L'analyse moyennée (1 seconde) du bruit coloré capté par le microphone fournit les pics des résonances de ces modes en 9a. Une deuxième mesure des résonances effectuée par excitation sinusoïdale a donné des résultats très voisins de ceux obtenus avec le bruit blanc. Le spectre 9b, pris au début du transitoire d'attaque, est effectué sur la portion de signal (100 ms) indiquée sur la Figure 8. On a donc simultanément les premiers harmoniques du son en train de s'établir est les composantes du son de bouche. On voit clairement que les sons de bouche M1, M2 et M3 sont très voisins des modes 4, 5 et 6 du tuyau. On se reportera au Tableau 2 pour les valeurs numériques des fréquences. Nous avons montré par ailleurs [24] que le fait d'augmenter l'amortissement des modes propres du tuyau, par exemple en badigeonnant la paroi interne du tube avec un produit absorbant, sans modifier les réglages de la bouche, avait pour effet d'atténuer fortement l'intensité des sons de bouche du transitoire mais ne modifiait pas leur contenu fréquentiel.

Le cas des sons produits par des doigtés de fourche sur la flûte à bec ou sur la flûte traversière à une clé (baroque) est aussi particulièrement inté-



Durchschnittsspektrum während einer langen Zeitdauer (1 Sekunde) (Abbildung 9a) ermittelt wurde. Eine zweite Messung der Resonanz mittels sinusoidaler Erregung ergab sehr ähnliche Resultate. Das Spektrum 9b wurde für die ersten 100 ms des Ansprache-Einschwingvorganges berechnet (der Ausschnitt wird in Abbildung 8 gezeigt). Deshalb stellt sie sowohl die Obertöne des Tonaufbaus als auch Komponenten des Mundtones dar. Es ist deutlich sichtbar, dass sich die Mundtöne M1, M2 und M3 sehr nahe an den Eigenschwingungen 4, 5 und 6 der jeweiligen Pfeife befinden. Die Zahlenwerte werden in Tabelle 2 angegeben. Durch eine Verstärkung der Dämpfung der Eigenschwingung der Pfeife (indem man beispielsweise die Innenwand des Pfeifenkörpers mit einem absorbierendem Material bedeckte, ohne jedoch den Pfeifenmund zu verändern) schwächt man nur die Mundtöne ab, ohne aber den Inhalt ihrer Frequenzen zu verändern [24].

Bei Blockflöten oder Querflöten mit einer Klappe enthalten die Töne, welche mittels eines Gabelgriffs erzeugt werden, besonders viele Mundtöne. Wegen unharmonischer Eigenschwingungen mangelt es den Tönen des stabilen Klangzustandes an Obertönen, doch bei der Ansprache entstehen Mundtöne, die viel intensiver und stabiler sind als diejenigen, welche durch Fingersätze ohne Gabelgriff erzeugt wurden. In Abbildung 10 werden Ansprache-Einschwingvorgänge für mit Gabelgriff erzeugte Töne (links) mit denjenigen für reguläre Fingersätze verglichen (rechts): erstere weisen ausgeprägtere Mundtöne auf. Bei dem Instrument handelt es sich um eine Altblockflöte, welche mittels des "Te"-Zungenstoßes gespielt wurde. Es kann leicht gezeigt werden, dass die Frequenzen der Mundtöne für die Fingersätze mit Gabelgriff den Eigenschwingungen der Pfeife entsprechen, welche bei diesen Fingersätzen ausgesprochen unharmonisch sind. Es ist eine Tatsache, dass solche Fingersätze leicht polyphone Klänge erzeugen, indem zwei oder drei Eigenschwingungen angeregt werden. In Orgeln kann man bei Rohrflöten dieselbe Beobachtung machen, da diese normalerweise unharmonische Resonanzschwingungen aufweisen. Bei diesem Pfeifentyp besteht die Kunst des

shown that the mouth tone frequencies for these fork fingerings correspond to the modes of the pipe, particularly inharmonic for these fingerings. As a matter of fact, such fingerings do easily produce multiphonic sounds by keeping up two or three modes. The same observation can be made in organs for chimney pipe, that usually display inharmonic resonant modes. For that type of pipes, the art of the organ voicer seems to consist in adjusting the attack so that the mouth tones catch the 3<sup>rd</sup> partial (close to the 5<sup>th</sup> harmonic) [21]. More on transient attacks for chimney organ pipes is given in Section 5.2.

*To sum up, during the pressure rise time of the transients, mouth tones frequencies may temporarily stabilize on passive resonances of the pipe, producing tones with well defined frequencies.*

### 3.3 Persisting mouth tones during normal pipe regime

Mouth tones which are too intensive and too stable can disturb the normal functioning of a pipe. As organ builders say, the pipe "sizzles" (in French: *grésille*), one hears "bees". Several remedies are used which usually consist in rounding off the edges of the flue exit with very fine sand paper, or to make small nicks in the flue. In some cases, the correct adjustment of a pipe may precisely correspond to the special effect of very high pitch inharmonic mouth tones coexisting with the periodic regime of the first mode. Such an aesthetic conception can be heard on very thin scaled pipes from e.g. the *salicional* or *gamba* stops.

The example displayed in Figure 11 is taken from the *viola 4'* stop, bass register from an Italian organ made by Serassi (1807) [32]. The first two notes of a descending scale,  $b^1 = 488.2$  Hz and  $b^b1 = 459.7$  Hz, recorded in the church of Tende (France) in 1989, are displayed. Figure 11 shows that these two sounds have complex spectra with many high rank spectral components, some of which are very intense in the 3 to 4 kHz range where the human ear is particularly sensitive. From the 4<sup>th</sup> component upwards, spectral lines look like being split in two. For both notes, the spectra averaged on the whole duration are plotted in Figure 12 where the verti-

ressant pour l'observation des sons de bouche. En effet, du fait de l'inharmonicité des modes, le son entretenu est souvent pauvre en harmoniques mais l'attaque présente des sons de bouche beaucoup plus intenses et plus stables que ceux des sons qui utilisent des doigtés sans fourches. La Figure 10 montre par comparaison, l'importance des transitoires d'attaques des sons de fourche (partie gauche). L'instrument est une flûte à bec alto, jouée avec une attaque de type "Te". On montre facilement que les fréquences des sons de bouche de ces doigtés de fourche correspondent à celles des modes du tuyau, particulièrement inharmoniques pour ces doigtés [24]. Il est d'ailleurs aisé, sur de tels doigtés de produire des sons multiphoniques en entretenant deux ou trois de ces modes. La même observation peut être faite avec les tuyaux d'orgue à cheminée qui possèdent habituellement des modes de résonances inharmoniques. Il semble que, pour ce type de tuyau, l'art du facteur d'orgue consiste à régler l'attaque de sorte que le son de bouche accroche le mode 3 voisin de l'harmonique 5 [21]. On trouvera des analyses plus détaillées du transitoire d'attaque de plusieurs tuyaux d'orgue à cheminée au §5.2.

*En résumé, au cours des variations de pression dues au transitoire, il arrive que certaines fréquences du son de bouche se stabilisent temporairement sur les résonances passives du tuyau en produisant des sons de fréquence définie. L'analyse de l'exemple suivant rend compte d'une stabilisation permanente du son de bouche.*

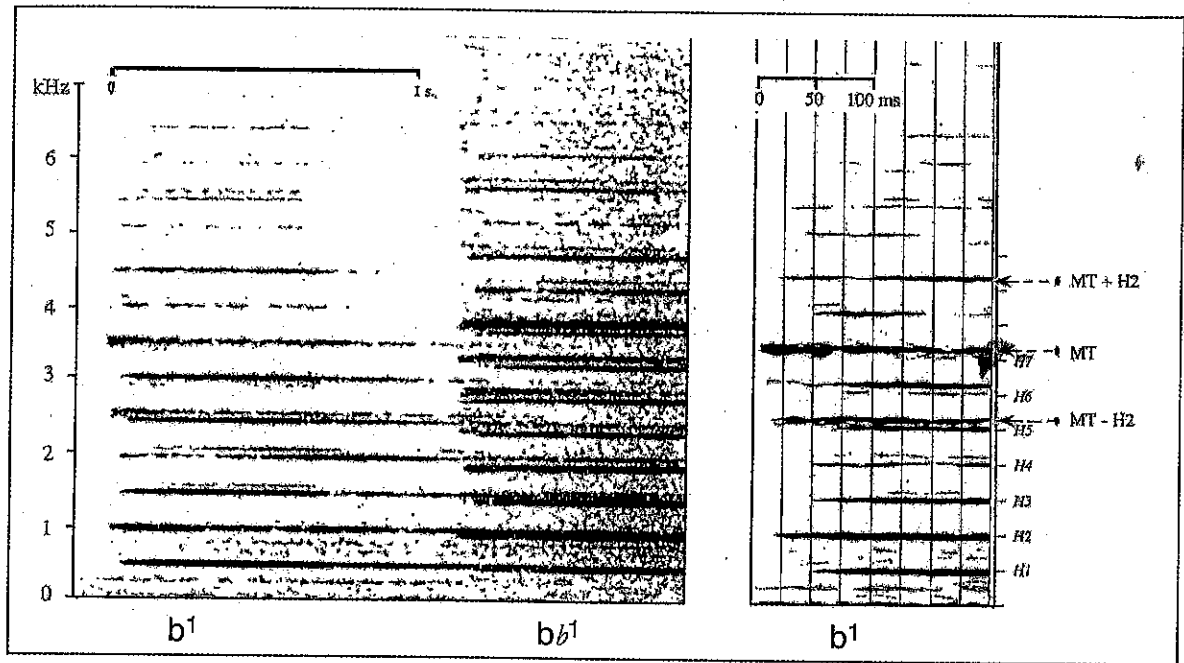
### 3.3 Un exemple de persistance des sons de bouche pendant le régime normal du tuyau

Des sons de bouche trop intenses et trop stables perturbent le fonctionnement normal du tuyau. Selon l'expression des facteurs d'orgue, le tuyau "grésille", on entend des "abeilles". Plusieurs remèdes sont utilisés qui consistent généralement à casser les arêtes trop vives de la lumière à l'aide d'un papier abrasif de grain très fin, voire à pratiquer des petites incisions dans la fente de la lumière, appelées "dents". Mais il arrive aussi que le bon réglage du tuyau soit justement la recherche de l'effet particulier d'un son de bouche aigu et inharmonique coexis-

**Figure 11**

Italian organ, *Viola 4'* stop

- a time/frequency analysis of two successive notes  $b^1$  and  $b^b1$
- b zooming in the attack transient of the first note. Notice the following succession of events; first comes the mouth tone (MT=3500 Hz), then the second harmonic H2 with two combination tones (MT+H2) and (MT-H2) that remain stable and of which the inharmonic frequencies give the Viola its particular "gritty" sound.



Analyse du jeu de *Viola 4'* d'un orgue italien

b Partie gauche: analyse spectrale de deux notes jouées successivement ( $Si3$  et  $Si^b3$ ).

a Partie droite: détail du transitoire d'attaque de la première note. L'analyse spectrale temporelle fait apparaître clairement les événements suivants: en premier lieu le son de bouche (MT=3500 Hz) puis, avec l'apparition de l'harmonique 2, deux sons de combinaisons, un additionnel (MT+H2) et un différentiel (MT-H2) qui restent stables pendant toute la durée du son, et dont les fréquences inharmoniques confèrent au son de Viola un caractère "grésillant" très particulier.

Italienische Orgel, Register *Viola 4'*

a Zeit/Frequenz-Analyse von den zwei aufeinanderfolgenden Tönen  $h^1$  und  $b^1$

b Ausschnitt aus dem Ansprache-Einschwingvorgang des ersten Tones. Beachten Sie die folgende Reihenfolge der Vorgänge: zuerst entsteht der Mundton (M=3500 Hz), danach der zweite Oberton H2 zusammen mit zwei Kombinationstönen (MT+H2) und (MT-H2), welche während der Dauer des Tones bestehen bleiben und deren inharmonische Frequenzen dem Klang der Viola einen sehr speziellen, "rauschenden" Charakter verleihen.

In tonateurs anscheinend darin, die Ansprache so zu regulieren, dass die Mundtöne den 3. Teilton anregen (nahe dem 5. Oberton) [21]. In Abschnitt 5.2 erhält man weitere Informationen zu den Ansprache-Einschwingvorgängen von Rohrflöten.

*Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass während der Zeit des Druckaufbaus bei den Einschwingvorgängen die Mundton-Frequenzen sich zeitweilig auf passiven Resonanzen der Pfeife stabilisieren und Töne mit genau definierten Frequenzen erzeugen.*

### 3.3 Fortbestehende Mundtöne während der normalen Funktionsweise der Pfeife

Mundtöne, welche zu intensiv und zu stabil sind, können die normale Funktionsweise der Pfeife stören. Die Pfeife "rauscht", wie Orgelbauer es bezeichnen, man hört "Bienen". Zur

cal grid strictly corresponds to the harmonic series of the fundamental frequency of each pipe. The two spectra are strikingly similar. The first harmonics are clearly aligned on the grid, but as the rank increases, higher pitch lateral lines appear that increase in intensity until they eventually supplant the harmonics of the fundamental. The higher halves of the spectra consist in inharmonic components. Zooming on the transient of the first note  $b^1$  (Figure 11b) reveals that the forerunner is the most intense component of this inharmonic series, MT1 = 3500 Hz. Afterwards come the second harmonic and two difference tones (MT1+H2) and (MT2-H2) simultaneously. They give rise to a transposed inharmonic series, analysed in Figure 12, which is made of difference tones created by a combination of the main mouth tone and the harmonics of the fundamental. Listening to this inharmonic sounds gives a very special sensation, quasi metallic

tant avec le régime périodique du mode 1. Une telle esthétique sonore se rencontre dans l'harmonisation des jeux de "taille très fine", comme le *salicional* et la *gambe*.

L'exemple dont nous donnons l'analyse à la Figure 11 est le jeu de *Viola 4'*, registre de basse d'un orgue Italien du facteur Serassi (1807) [32]. Les deux premiers sons d'une gamme chromatique descendante,  $Si3 = 488,2$  Hz et  $Si^b3 = 459,7$  Hz, enregistrés dans l'église de Tende (France) en 1989 ont été analysés. Le sonagramme de la Figure 11a montre deux sons de spectre complexe, riches en composantes de rang élevé, dont certaines très intenses dans la zone de 3 à 4000 Hz où l'oreille est particulièrement sensible. A partir de la quatrième composante les raies spectrales semblent dédoublées. Pour chaque son nous avons réalisé un spectre moyenné sur toute la durée, et nous avons tracé en quadrillage vertical les traits correspondant strictement à la série harmonique de la fré-

**Figure 12**

Italian organ, *Viola 4'*

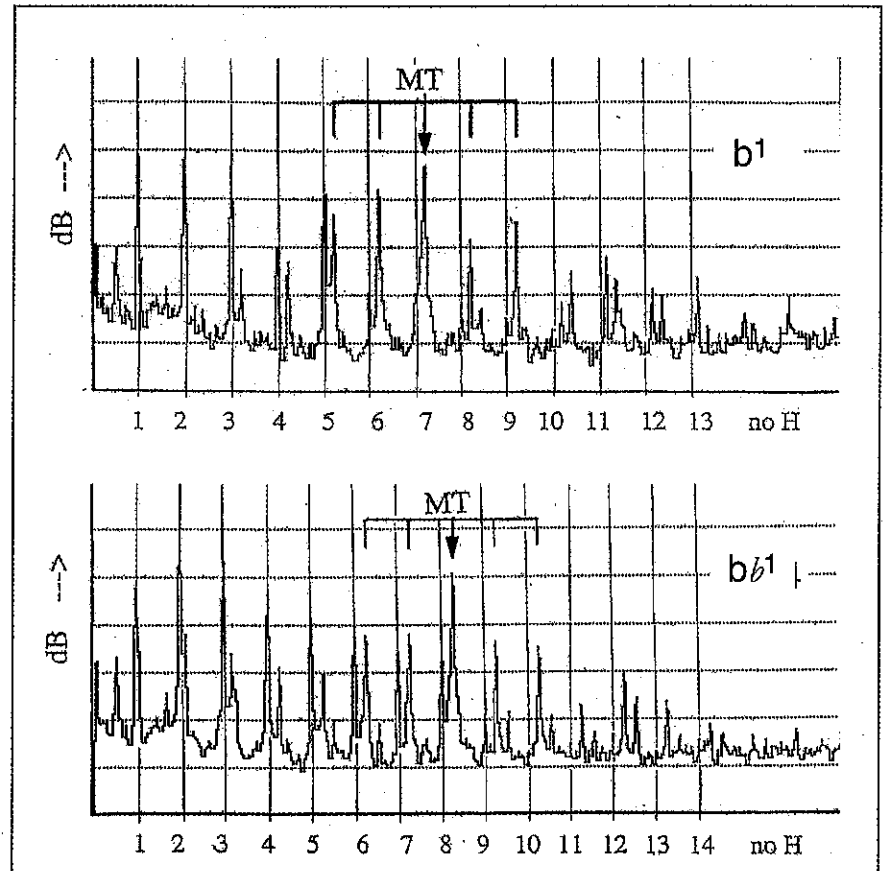
Mean spectra for  $b^1$  and  $bb^1$ . Vertical lines indicate the harmonics of the fundamental of each note, showing that Mouthtone frequencies are clearly inharmonic.

Orgue Italien, jeu de *Viola 4'*

Spectres moyennés des deux notes  $Si3$  et  $Si\flat3$ . Pour chaque spectre le quadrillage vertical est centré sur la série harmonique du fondamental, ce qui fait apparaître clairement le caractère inharmonique de ces spectres.

Italienische Orgel, Register *Viola 4'*

Durchschnittliche Spektren für  $h^1$  und  $b^1$ . Die vertikalen Linien repräsentieren jeweils die Obertöne des Grundtones, dadurch wird es klar ersichtlich, dass die Frequenzen der Mundtöne unharmonisch sind.



Beseitigung dieses Geräusches gibt es verschiedene Möglichkeiten. Diese bestehen normalerweise darin, die Kanten des Kernspaltes mit sehr feinem Sandpapier zu brechen oder kleine Kernstiche anzubringen. In einigen Fällen kann die korrekte Einstellung der Pfeife genau dem speziellen Effekt von sehr hohen, unharmonischen Mundtönen entsprechen, welche mit der periodischen Schwingung des Grundtones koexistieren. Eine solche ästhetische Konzeption findet man bei sehr engen Registern, beispielsweise bei *Gamben* oder *Salicionalen*.

Das in Abbildung 11 gezeigte Beispiel stammt vom Bassregister *Viola 4'* einer italienischen Orgel, welche 1807 von Serassi geschaffen wurde [32]. Die ersten zwei Noten einer absteigenden Tonleiter,  $h^1 = 488.2$  Hz und  $b^1 = 459.7$  Hz, welche 1989 in der Kirche von Tende (Frankreich) aufgenommen wurden, werden dargestellt. Abbildung 11 zeigt, dass diese beiden Klänge über sehr komplexe Spektren mit vielen spektralen Komponenten verfügen, die reich an hohen Obertönen sind. Davon sind einige sehr intensiv im Bereich zwischen 3 und 4 kHz, auf den das menschliche Ohr

and slightly grating. For notes  $b^1$  and  $bb^1$ , the mouth tones stabilize on the 7<sup>th</sup> and the 8<sup>th</sup> modes of the pipe respectively.

### 3.4 Variations of attack transients with pressure rise slopes

The experiment was carried out on alto recorder No. 1 played through the small organ chest in order to obtain a specified constant pressure. The pallet was activated manually. The upper half of Figure 13 displays the pressure rises and the sonagram analysis of the corresponding tones. The lower half zooms in on the very transients with the sound waveform and its sonographic analysis<sup>4</sup>. Pressure build-ups are from left to right 50 ms, 30 ms and 15 ms respectively. These amount to 43.5 periods of the fundamental for the slow transient, 26 for the intermediate transient and 13 for the fast transient. The rise times of the corresponding sounds do not follow the

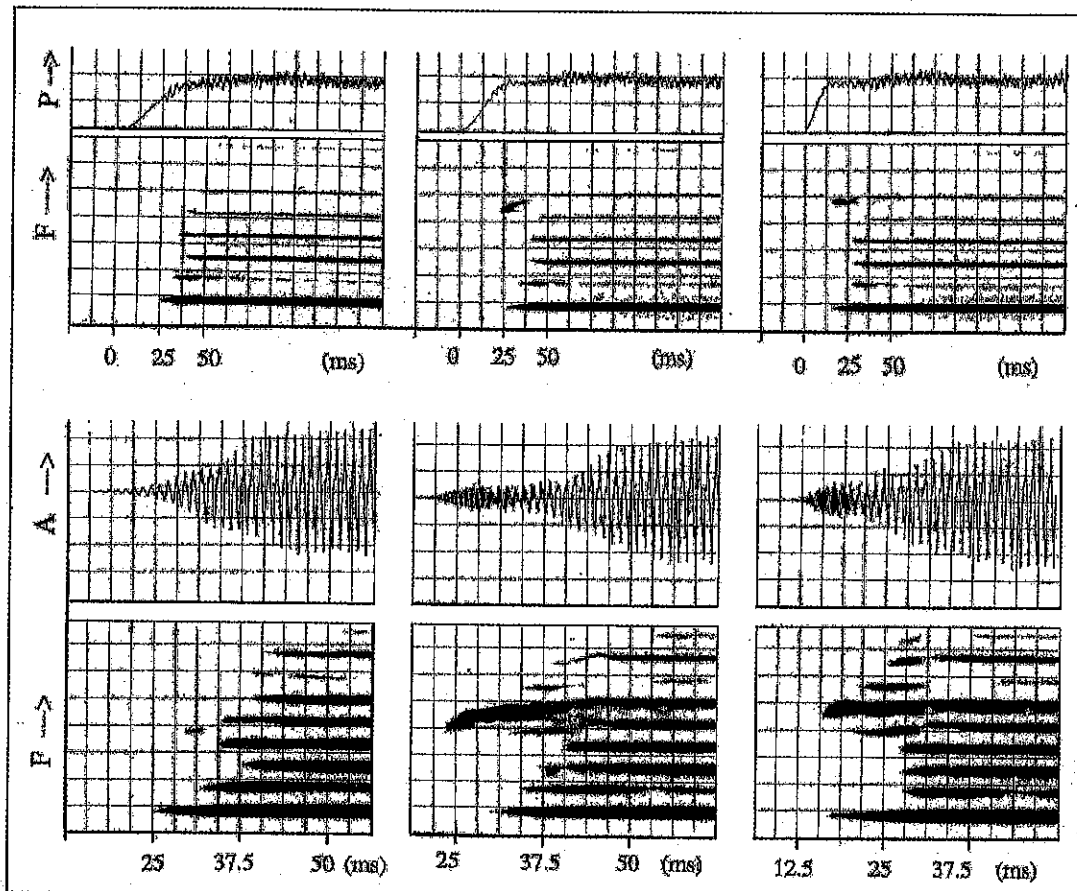
4 Technical data for Figure 13. Sample frequency: 20.48 kHz. Upper part: transform size = 200 pts or 9.6 ms ( $\Delta f=150$  Hz); overlap = 25; sample per pixel = 8. Lower part: transform size = 128 pts or 6,25 ms ( $\Delta f=234$  Hz). overlap = 64; sample per pixel = 2

quence fondamentale (Figure 12). Les deux spectres présentent une allure commune étonnante. Les premiers harmoniques alignés sur le quadrillage sont nettement identifiables mais, au fur et à mesure qu'on s'élève dans la série, une composante collatérale plus aiguë apparaît et croît en intensité, pour finalement supplanter totalement les harmoniques du fondamental. La partie haute du spectre est constituée de composantes inharmoniques. Si l'on examine maintenant l'analyse détaillée du transitoire de la 1<sup>ère</sup> note  $Si3$  (Figure 11b), on voit que le "précurseur" du son du tuyau est la composante la plus intense de cette série inharmonique,  $MT1 = 3500$  Hz. Viennent ensuite, de façon concomitante, l'harmonique 2, un son additionnel  $MT1+H2$  et un son différentiel  $MT1-H2$ . On voit naître ainsi la série inharmonique décalée (analysée Figure 12), composée des sons de combinaison se produisant entre le son de bouche principal et les harmoniques du fondamental. A l'écoute, le spectre inharmonique donne une qualité sonore très particulière, quasi métallique et un peu grinçante. Pour la note  $Si3$  le son de bouche  $MT1$  s'est stabilisé sur le mode 7 du tuyau; pour la note  $Si\flat3$  c'est

**Figure 13**

Alto Recorder No. 1 played via an organ chest for three different slopes and rise times and the same specified static pressure  $P = 440$  Pa at mouth input. All the holes are open ( $F = 870$  Hz). From left to right: three types of speech: slow, medium and fast. From top to bottom: pressure variations at the mouth input; time/frequency analysis of the sound; sound waveform; time/frequency analysis of the sound. Notice the different scales: 12.5 ms/div for the upper part, 3.12 ms/div for the lower part.

Flûte à bec alto N°1 posée sur un sommier d'orgue. Pression statique = 440 Pa à l'entrée du bec. Tous les trous sont ouverts ( $F = 870$  Hz). Variation du contenu spectral du transitoire d'attaque avec le temps de montée de la pression. De gauche à droite, trois types d'attaques: lent, moyen et rapide. De haut en bas on lit: la variation de pression à l'entrée du bec; l'analyse spectrographique du son; la forme d'onde temporelle et l'analyse. L'échelle temporelle des analyses est plus détaillée à la partie inférieure (3,12 ms/division) qu'à la partie supérieure (12,5 ms/division).



Altblockflöte Nr. 1 angespielt mittels der Orgel-Windlade für drei unterschiedliche Druckaufbauzeiten. Alle Löcher sind geöffnet ( $F = 870$  Hz). Der statische Druck ist gleichbleibend und beträgt  $P = 460$  Pa am Eingang des Pfeifenmundes. Von links nach rechts: drei Ansprachtypen: langsam, mittel und schnell. Von oben nach unten: Druckvariationen am Eingang des Pfeifenmundes; Zeit/Frequenz-Analyse des Klanges; Klangwellenform; Zeit/Frequenz-Analyse des Klanges. Beachten Sie die unterschiedlichen Skalen: 12,5 ms/Teilstrich für den oberen Teil, 3,12 ms/Teilstrich für den unteren Teil.

besonders sensibel reagiert. Ausgehend von der 4. Komponente aufwärts erzeugen die Spektrallinien den Eindruck, als wären sie zweigeteilt. Für beide Noten sind die Durchschnittsspektren der gesamten Klangdauer in Abbildung 12 dargestellt, bei welcher das vertikale Raster strikt der harmonischen Obertonreihe der Fundamentfrequenz der jeweiligen Pfeife entspricht. Die beiden Spektren sind einander erstaunlich ähnlich. Die ersten Obertönen befinden sich eindeutig auf dem Raster, doch sobald die Reihe aufsteigt, erscheinen laterale Linien hoher Töne, deren Intensität ansteigt, bis sie teilweise die Obertönen des Grundtones verdrängen. Die oberen Hälften des Spektrums bestehen aus unharmonischen Komponenten. Betrachtet man den Einschwingvorgang der ersten Note  $h^1$  (Abbildung 11b), erkennt man, dass der Vorläufer  $MT1 = 3500$  Hz die intensivste Komponente dieser unharmonischen Serie ist. Darauf folgen der 2. Oberton und zwei

same progression. The longest transient when listening corresponds to Figure 13b with an intermediate pressure rise time: the mouth tone takes such an importance that it delays the onset of the fundamental. Therefore, there is no simple relation between pressure rise time in the foot and attack transient duration for a mouth pipe.

## 4 Discussion

### 4.1 The present experimental results

The acoustical analysis of organ and recorder sounds with good musical quality has shown the existence of mouth tones preceding the onset of the steady tone harmonics. Basically, two experimental techniques were used: fine resolution time/frequency analysis of transient signals; and systematic comparison between the sounds produced by the jet/labium system of the mouth disconnected from the pipe and the

le mode 8 qui est accroché.

### 3.4 Variation du transitoire d'attaque avec la pente d'établissement de la pression

L'expérience est réalisée avec la flûte à bec alto expérimentale (N°1) jouée par l'intermédiaire du mannequin d'orgue pour obtenir une pression cible constante. L'ouverture de la soupape est réalisée manuellement. La partie supérieure des trois Figures 13a, b et c représente la courbe de pression puis l'analyse sonographique du son correspondant. La partie inférieure, à une échelle temporelle plus détaillée, montre la forme d'onde

- 4 Caractéristiques des analyses de la figure 13 : Fréquence d'échantillonnage 20,48 kHz; Partie supérieure de la figure, FFT = 200 pts soit 9,6 ms ( $\Delta f = 150$  Hz). Taux de recouvrement = 25. Nombre d'échantillons par pixel = 8. Partie inférieure FFT = 128 pts soit 6,25 ms ( $\Delta f = 234$  Hz). Taux de recouvrement = 64. Nombre d'échantillons par pixel = 2

Differenztöne (MT1+H2) und (MT2-H2) gleichzeitig. Dadurch entsteht eine transponierte unharmonische Serie (analysiert in Abbildung 12), welche aus Differenztönen besteht, die durch eine Kombination des dominanten Mundtones und den Obertönen des Grundtones entstanden sind. Wenn man sich diese unharmonischen Klänge anhört, hat man einen sehr speziellen Eindruck, es klingt fast metallisch und leicht kratzend. Bei den Noten  $h^1$  und  $b^1$  stabilisieren sich die Mundtöne jeweils auf der 7. und 8. Eigenschwingung der Pfeife.

### 3.4 Variationen der Ansprache-Einschwingvorgänge durch Druckaufbau-Kurven

Das Experiment wurde mit der Altblockflöte Nr. 1 durchgeführt, welche mittels der kleinen Orgelwindlade angespielt wurde, um einen genau bestimmten, gleichmäßigen Druck zu erhalten. Das Ventil wurde manuell betätigt. Die obere Hälfte von Abbildung 13 zeigt den Druckaufbau und die Analyse des Sonagramms der entsprechenden Töne. Die untere Hälfte stellt die entsprechenden Einschwingvorgänge mit der Klangwellenform und ihrer sonografischen Analyse dar<sup>4</sup>. Die Druckaufbauzeiten sind von links nach rechts jeweils 50 ms, 30 ms und 15 ms. Diese betragen 43,5 Perioden des Fundamenttones für den langsamen Einschwingvorgang, 26 für den mittleren und 13 für den schnellen Einschwingvorgang. Die Aufbauzeiten der entsprechenden Klänge folgen nicht demselben Verlauf. Der längste Einschwingvorgang entspricht Abbildung 13b mit der mittleren Druckaufbau-Zeit: der Mundton wird dermaßen wichtig, dass er das Einsetzen des Grundtones verzögert. Deshalb besteht kein einfacher Zusammenhang zwischen Druckaufbau-Zeit im Pfeifenfuß und der Dauer des Ansprache-Einschwingvorganges für eine Labialpfeife.

## 4 Diskussion

### 4.1 Die vorliegenden experimentellen

4 Technische Daten für Abbildung 13: Abtastfrequenz = 20,48 kHz, Oberer Teil der Abbildung: FFT = 200 pkt oder 9,6 ms ( $\Delta f = 150$  Hz). Überlappung = 25. Samples per Pixel = 8. Unterer Teil: FFT = 128 pkt oder 6,25 ms ( $\Delta f = 234$  Hz). Überlappung = 64. Samples per Pixel = 2

sound produced by the whole flue pipe under regular functioning. The following observations were made:

- 1 Under the same conditions of pressure supply, edge tones produced by the mouth only and transient mouth tones produced by the whole pipe are similar. As a consequence, mouth tones of attack transients of flue pipes are, like edge tones, controlled by the two main mouth parameters: the jet velocity at the flue exit, and the flue/labium distance.
- 2 Mouth tones are produced before the onset of the pipe harmonics. In other words, during the attack transient, the regular steady state modes of a flue pipe only come after a completely different regime, the latter being under the sole control of the mouth.
- 3 The spectra of mouth tones have great variety and usually contain several frequencies. More complex mouth tones were obtained for organ pipes than for recorders.
- 4 For a given instrument, mouth tones are extremely dependent on the supply pressure, just like edge tones. In order to compare attack transients, it is therefore extremely important to precisely control not only the pressure rise time but also the precise shape of the pressure rise at the very beginning of the pallet opening. As supply pressure increases, intensity increases quickly, frequency increases within a given hydrodynamic regime, and vortex noises increase as well. However, due to the existence of several hydrodynamic regimes and their instabilities, the frequency of the mouth tones can jump to a lower value whilst pressure keeps on increasing.
- 5 When frequencies are close, a mouth tone can stabilise very briefly on one of the pipe modes resonance, its perceptive importance being thus emphasized, ("chirp, ping") even if the transient is very short. In order to make the phenomenon more clearly audible, the pressure rise time can be stretched over several seconds. This phenomenon is reversible and can also be heard when the pressure slowly decreases:

puis le sonagramme des mêmes transitoires<sup>4</sup>. Les mesures de la durée d'établissement de la pression sont respectivement : du plus lent au plus rapide : 50 ms ; 30 ms ; 15 ms. Ce qui, en nombre de périodes du fondamental donne 43,5 pour l'attaque lente ; 26 pour l'attaque moyenne et 13 pour l'attaque brève. Le temps d'établissement du régime fondamental ne suit pas la même progression. Le son dont l'attaque paraît la plus longue à l'écoute est celui de 13b pour lequel la montée en pression est de durée moyenne, car le son de bouche y prend une telle importance que l'établissement du fondamental est retardé. Il n'y a donc pas de relation simple entre le temps d'établissement de la pression dans le pied et la durée du transitoire d'attaque d'un tuyau à bouche.

## 4 Bilan et discussion

### 4.1 Conclusions des expériences présentées

Sur la base d'analyses acoustiques de sons d'orgue et de flûte à bec réputés de bonne qualité musicale, nous avons mis en évidence la présence de sons de bouche précédant l'établissement des harmoniques du son stationnaire. Les résultats présentés dans ce travail sont obtenus grâce à deux techniques expérimentales. En premier lieu l'analyse spectrographique fine, de type temps/fréquence, des signaux transitoires. En second lieu la comparaison systématique des sons produits par le système lame d'air biseau de l'embouchure déconnectée du tuyau avec ceux du même tuyau à bouche dans son utilisation normale. Les faits suivants ont été observés.

- 1 L'étude détaillée d'une flûte à bec et d'un tuyau d'orgue a permis d'établir que, pour les mêmes conditions de pression, les sons de biseau produits par l'embouchure isolée et les sons de bouche du transitoire du tuyau complet sont similaires. On en conclut que les sons de bouche du transitoire d'attaque d'un tuyau à bouche sont, comme les sons de biseau, contrôlés par les paramètres de l'embouchure : vitesse du jet à la lumière et distance lumière biseau.
- 2 Les sons de bouche précèdent l'arrivée des harmoniques du tuyau. Il faut donc considérer que, pendant le

## Ergebnisse

Die akustische Analyse von Orgel- und Blockflötenklängen guter musikalischer Qualität hat die Existenz von Mundtönen gezeigt, welche dem Einsetzen der Obertöne des konstanten Tones vorausgehen. Grundsätzlich wurden zwei Experimentiertechniken genutzt: fein aufgelöste Zeit/Frequenz-Analyse der Signale von Einschwingvorgängen und systematischer Vergleich zwischen den Klängen, welche einerseits aus dem Luftband/Labium-System des von der Pfeife getrennten Mundstückes und andererseits aus der kompletten Pfeife bei regulärer Funktion hervorgingen. Es wurde folgendes beobachtet:

- 1 Unter gleichen Bedingungen der Windversorgung sind die nur vom Mundstück erzeugten Schneidentöne und die beim Einschwingvorgang erzeugten Mundtöne der kompletten Pfeife ähnlich. Daraus ist zu schlussfolgern, dass sowohl die Mundtöne von Ansprache-Einschwingvorgängen als auch die Schneidentöne bei Lippenpfeifen von den zwei hauptsächlich Parametern des Pfeifenmundes bestimmt werden: der Schnelle des Luftbandes am Kernspalt und dem Abstand zwischen Kernspalt und Oberlabium.
- 2 Mundtöne entstehen vor dem Einsetzen der Obertöne der Pfeife. Anders ausgedrückt, während des Ansprache-Einschwingvorganges setzen die Eigenschwingungen der Pfeife erst nach einer komplett anderen Funktionsweise ein. Letztere befindet sich unter der alleinigen Kontrolle des Pfeifenmundes.
- 3 Die Spektren der Mundtöne zeigen eine große Verschiedenartigkeit und enthalten gewöhnlich mehrere Frequenzen. Bei Orgelpfeifen erhielt man komplexere Mundtöne als bei Blockflöten.
- 4 Bei einem gegebenen Instrument sind die Mundtöne genauso wie die Schneidentöne sehr stark abhängig vom Druck der Windversorgung. Um Ansprache-Einschwingvorgänge miteinander vergleichen zu können ist es deshalb extrem wichtig, nicht nur die Druckaufbauzeit, sondern auch die präzise Form des Druckaufbaus von Beginn der Ventilöffnung an genau zu

if one key remains depressed while turning off the air supply of the organ; the pipe "cheeps", as well known to organists.

- 6 Mouth tones can hit one or several high rank resonant modes, especially when they have many high pitch components and when the pipe proportions give rise to quasi harmonic resonances (fine scaled pipe, large length to diameter ratio).
- 7 In most cases, mouth tones vanish at the onset of the steady state regime. In other cases (e.g. in Figure 4) mouth tones survive a short while (20 ms to 40 ms) during the build up of the steady state regime. In the latter case, tones can be created by combination of the main mouth tone with the first harmonics of the pipe, revealing non linearity in the excitation system.
- 8 The coexistence of mouth tones stabilized on inharmonic partials of the pipe with steady state harmonic series, that is, the coexistence of two different regimes can last during the whole tone. This paradoxical regime is sought for in some narrow scaled organ pipes (*gambas*).

### 4.2 Comparison with experimental results from literature

#### 4.2.1 On the nature of forerunners

Mouth tones are mentioned by several authors who either used words that bring to the mind the anticipatory function of mouth tones: "precursor, forerunner, *Vorlauferton*", [1,30,14], or onomatopoeia that imitate their quasi-percussive high spectrum content: "chiff, chirp, ping, spitz" [13,11].

Nolle and Finch [14] carried out several experiments to find out the nature of the forerunners that appear in pipe sounds at a frequency equal to 4 or 5 times the fundamental frequency. They noticed that forerunners survive the following modifications :

- disconnecting the pipe from the mouth by filling it with absorbing material;
- leaving the pipe open, or stopping it;
- substituting a cylindrical pipe by a parallelepipedic pipe, the mouth

transitoire d'attaque, le mode d'entretien "normal" d'un tuyau à bouche peut être précédé par un mode d'oscillation du jet de type "buccal".

- 3 Les spectres des sons de bouche sont d'une grande diversité, et constitués le plus souvent de plusieurs fréquences. Dans les exemples présentés ils sont plus complexes pour les tuyaux d'orgue que pour la flûte à bec.
- 4 Pour un instrument donné les sons de bouche varient énormément avec la pression, de façon analogue aux sons de biseau. Il est important, pour comparer des expériences, de maîtriser non seulement la durée d'établissement de la pression, mais aussi la forme précise de cette montée au tout début de l'ouverture de la soupape. Avec l'augmentation de la pression, l'intensité croît rapidement, la fréquence augmente dans un régime donné, le bruit de turbulence augmente aussi. Mais du fait de l'existence de plusieurs régimes buccaux et de l'instabilité de ceux-ci, la fréquence d'un son de bouche peut passer à une valeur inférieure alors que la pression continue d'augmenter. (Figure 14).
- 5 Lorsque sa fréquence en est voisine, un son de bouche peut se stabiliser de façon fugitive sur la résonance (inharmonique) d'un des modes du tuyau et prendre ainsi une importance perceptive remarquable ("chirp, ping") même si ce transitoire est bref (Figures 8 et 9). Pour rendre le phénomène plus appréciable auditivement il suffit d'allonger le temps de montée de la pression sur plusieurs secondes. Cet effet est réversible et se produit également lors d'une baisse graduelle de la pression. Lorsqu'après avoir coupé l'alimentation d'un orgue on maintient enfoncées quelques touches, on entend le "piaulement" des tuyaux, bien connu des organistes.
- 6 Le (ou les) mode(s) de résonance accrochés par les sons de bouche peuvent être d'ordre élevé, surtout lorsque le son de bouche est riche en composantes aiguës et que les proportions du tuyau fournissent des résonances proches des harmoniques (taille fine, L/D grand).
- 7 Dans la plupart des cas les sons de

kontrollieren. Mit dem Anstieg des Druckes der Windversorgung steigt die Intensität schnell an, die Frequenz steigt innerhalb einer gegebenen hydrodynamischen Funktionsweise an und die von Luftwirbeln erzeugten Geräusche nehmen zu. Jedoch können die Frequenzen der Mundtöne aufgrund der Existenz von mehreren hydrodynamischen Funktionsweisen und deren Instabilität auf einen niedrigeren Wert springen, während der Winddruck weiterhin ansteigt.

- 5 Wenn sich die Frequenzen nah beieinander befinden, kann sich ein Mundton sehr kurz auf einer der Eigenschwingungs-Resonanzen der Pfeife stabilisieren, die wahrgenommene Bedeutung kann deshalb verstärkt sein ("chirp, ping"), selbst wenn der Einschwingvorgang sehr kurz ist. Um dieses Phänomen besser hörbar zu machen, kann die Druckaufbauzeit über mehrere Sekunden ausgedehnt werden. Dieses Phänomen ist umkehrbar und kann auch gehört werden, wenn der Druck langsam abnimmt: wenn eine Taste gedrückt bleibt, während die Windversorgung der Orgel abgeschaltet wird, "zirpt" die Pfeife, wie die Organisten gut wissen.
- 6 Mundtöne können auf einen oder mehrere Obertöne höherer Ordnung treffen, vor allem dann, wenn sie über mehrere Komponenten mit hohen Frequenzen verfügen und wenn die Pfeifendimensionen quasi-harmonische Resonanzen bedingen (eng mensurierte Pfeifen; große Länge im Verhältnis zum Durchmesser).
- 7 In den meisten Fällen verschwinden Mundtöne mit dem Einsetzen des stabilen Klangzustandes. In anderen Fällen (z.B. Abbildung 4) überleben sie eine kurze Zeit (20 ms bis 40 ms) während des Aufbaus des stabilen Klangzustandes. Im letzten Fall können durch die Kombination des wichtigsten Mundtones mit den ersten Obertönen der Pfeife neue Töne entstehen, wodurch die Nichtlinearität des Erregungssystems zutage tritt.
- 8 Manchmal besteht eine Koexistenz von Mundtönen, welche sich auf unharmonischen Teiltönen der Pfeife stabilisieren, und den Serien harmonischer Obertöne des stabilen

being left unchanged.

On the other hand, the forerunner is modified when a reflecting plate is positioned on the rear wall of the mouth.

These four observations do not contradict the hypothesis stating that forerunners are produced by the mouth operating in an hydrodynamic regime. It seems therefore paradoxical that Nolle and Finch did not find any agreement between the forerunner frequencies and the edge tones frequencies of the mouth disconnected from the pipe. The main reason is, according to our interpretation, that they used a pipe with an adjustable mouth. Any change in the distance between the flue exit and the labium, and, even more critical, any change in the width of the flue, has a drastic influence on the edge tones: their frequencies and their stability are altered. Nolle and Finch explain that experiments on edge tones were carried out with a mean adjustment of the mouth height, different from the adjustment used for the main experiments. As a consequence, phenomena could not be compared.

Fletcher also mentions the "chiff" of baroque voicing [11] but doesn't describe it because the pipe he used did not produce it. He therefore assumed an "underblown" regime without further justification.

#### 4.2.2 Forerunners and pipe resonances.

Contrary to Nolle and Finch's statement [14], the mouth tone forerunner stabilizes on one of the resonant frequency of the pipe, whenever it stabilizes (e.g. in Figure 9). This is particularly noticeable when modes are highly inharmonic as for some chimney pipes, or for fork fingerings on recorders.

#### 4.2.3 Slope variation of pressure build-up

Our experiment on slope variation of the pressure build-up in the foot of an organ pipe (see Section 3.4) is in good agreement with Nolle and Finch's results. Mouth tones are most noticeable for intermediate rise times, that is, neither too short nor too long. When transients are slow, a first regime progressively sets up without forerunner because edge tones either are too weak

bouche s'estompent avec l'installation du régime stationnaire. Nous avons montré (Figure 4) qu'on observe souvent un bref intervalle de temps (20 à 40 ms) pendant lequel les sons de bouche coexistent pendant l'instauration du régime stationnaire. Il se produit alors des sons de combinaison (additionnels et différentiels) entre le son de bouche principal et les premiers harmoniques du tuyau, indices d'un comportement non-linéaire du système exciteur.

- 8 La coexistence de deux modes d'entretien : le son de bouche stabilisé sur un partiel inharmonique du tuyau d'une part, et la série des harmoniques du régime stationnaire d'autre part, peut s'installer pendant toute la durée du son. Ce mode paradoxal de fonctionnement du tuyau à bouche est recherché dans certains jeux d'orgue de taille "étroite" (*gambes*).

## 4.2 Discussion

### 4.2.1 Sur la nature du précurseur

Les sons de bouche sont mentionnés par plusieurs auteurs. Ils sont désignés tantôt par un terme rendant compte de leur caractère anticipatoire : "précurseur, forerunner, Vorlauferton" [1,30,14] tantôt par des onomatopées qui traduisent leur effet quasi-percussif et le contenu aigu de leur spectre : "chiff, chirp, ping, spitz" [13,11].

Nolle et Finch [14] ont réalisé plusieurs expériences pour expliquer la nature du précurseur apparaissant dans le son de leur tuyau, et dont la fréquence est 4 à 5 fois la fréquence fondamentale. Ils constatent que le précurseur continue à se produire malgré les modifications suivantes :

- le tuyau est déconnecté de la bouche (par l'usage d'un absorbant) ;
- le tuyau est bouché ou ouvert ;
- un résonateur cylindrique est substitué au tuyau parallélépipédique, la bouche restant inchangée.

Par contre le précurseur est modifié par l'ajout d'une plaque réfléchissante sur la paroi arrière de la bouche.

Ces quatre observations ne sont pas contradictoires avec l'hypothèse que le précurseur est produit par la bouche fonctionnant en mode "sons de biseau".

Klangzustandes. Das heißt, dass die Koexistenz von zwei verschiedenen Klangzuständen während der gesamten Tonlänge andauern kann. Diesen paradoxen Zustand strebt man bei einigen engen Orgelregistern an (*Gamben*).

#### 4.2 Vergleich mit experimentellen Ergebnissen aus der Literatur

##### 4.2.1 Über die Natur des Vorläufertones

Mundtöne werden von mehreren Autoren erwähnt, welche entweder Wörter benutzten, um die vorangehende Funktion von Mundtönen zum Ausdruck zu bringen: "precursor, forerunner, Vorläuferton", [1,30,14], oder Lautmalereien, welche den fast schlagartig einsetzenden, hochfrequenten Aspekt imitieren: "chiff, chirp, ping, spitz" [13,11].

Nolle und Finch [14] führten mehrere Experimente aus, um die Natur des Vorläufertones herauszufinden, welcher bei Pfeifen bei einer Frequenz auftritt, die 4 oder 5 Mal der Grundton-Frequenz entspricht. Sie stellten fest, dass Vorläufer die folgenden Veränderungen überleben:

- die Trennung der Pfeife vom Pfeifenmund, indem sie mit absorbierendem Material gefüllt wird;
- Die Pfeife entweder offen oder gedeckt zu lassen;
- Ersetzen einer zylindrischen Pfeife durch eine Pfeife mit rechteckigem Querschnitt, wobei der Pfeifenmund unverändert erhalten bleibt.

Andererseits wird der Vorläuferton verändert, wenn eine reflektierende Tafel vor die Hinterwand des Pfeifenmundes gesetzt wird.

or have too low frequencies. When transients are plosive, the pressure quickly reaches a very high level, corresponding to edge tones that sound like band-pass noise. The steady state regime (either 1<sup>st</sup> or 2<sup>nd</sup> mode, according to pipe adjustment) starts very quickly, within a few periods. Between these two extremes, a great variety of attack transients can be achieved, depending on the spectral contents of the mouth tones and the slope of the pressure build-up. Remember that the rise time of the tone in the pipe does not stand in one to one correspondence with the rise time of the pressure in the foot.

Translation: Jean-Dominique Polack

■ The last part of this article will be published in *ISO Journal No. 12*, November 2001

Il peut sembler alors paradoxal que les auteurs n'aient trouvé aucune correspondance entre la fréquence du pré-curseur et celles du son de biseau de l'embouchure déconnectée du résonateur. La raison principale tient, selon nous, au fait qu'ils utilisent un tuyau dont la bouche est réglable. Toute modification de la distance lumière biseau, et plus encore de la largeur de la lumière a un retentissement critique sur la production des sons de biseau : leurs fréquences et la stabilité des régimes. Les auteurs relatent que la mesure des sons de biseau a été faite avec un réglage "moyen" de la hauteur de bouche, différent de ceux des expériences présentées. Les phénomènes ne sont donc pas comparables.

Par ailleurs Fletcher [11] évoque le "chiff" de l'harmonie baroque mais n'en donne aucune description, le tuyau qu'il a utilisé ne le produisant pas. Il fait l'hypothèse d'un fonctionnement en régime de "buccal" (*Underblown*) sans autre développement.

##### 4.2.2 Le précurseur et les résonances du tuyau

Contrairement à ce qu'affirment Nolle et Finch [14] nous avons observé à plusieurs reprises et nous avons montré (Figure 9) que la fréquence du son de bouche précurseur, lorsqu'elle se stabilise, est celle d'un mode de résonance du tuyau. Les phénomènes sont particulièrement clairs lorsque les modes sont très inharmoniques comme c'est le cas pour certains tuyaux à cheminée, ou pour les doigtés dits "de fourche" de la flûte à bec.

##### 4.2.3 Variation de la pente du transitoire de pression

#### Bibliography / Bücherverzeichnis / Références Bibliographiques

- 1 Jones A. T. (1939) *Recent investigations of organ pipes*, J.A.S.A. **11**, 122-128
- 11 Fletcher N. H. (1976) *Sound production by organ flue pipes*, J.A.S.A. **60**, 926-936
- 13 Nolle A. W. (1979) *Some voicing adjustments of flue organ pipes*, J.A.S.A. **66**, 1612-1626
- 14 Nolle A. W., Finch T. L. (1992) *Starting transients of flue organ pipes in relation to pressure rise time*, J.A.S.A. **91**, 2190-2202
- 21 Verge M. P., Schoffelen R., Wijnands A., Hirschberg A., Box C., (1997) *Acoustic behavior of chimney pipes*, ISMA **97**, Edinburgh
- 24 Castellengo M. (1976) *Contribution à l'étude expérimentale des tuyaux à bouche*, Thèse, Université de Paris VI
- 30 Löffertmoser W. (1983) *Orgel, Kirchen und Akustik*, Verlag E.Bochinsky, Frankfurt/Main, Vol II, 23, et Vol I, 63-64
- 31 Finch T.L., Nolle A.W. (1986) *Pressure wave reflections in an organ note channel*, J.A.S.A. **79**, 1584-1591.
- 32 Castellengo M. (1990) *Etude acoustique des orgues italiens de la vallée de la Roya*, L'orgue Italien, Cahier des Alpes-maritimes, N°7, Nice.
- 33 Ganassi S. (1535) *Opera intitolata Fontegara, la quale insegna a sonare di flauto*, Venise, Facsimile, Bollet/Bibl.) mus., Milano (1934).
- 34 Castellengo M. (1977) *Analyses spectrographiques de quelques jeux d'un orgue*, La revue Musicale, Paris, **295-296**, 103-111.



# ISO Journal

ISSN 1017—7515

The Magazine of the International Society of Organbuilders

Afgiftkantoor ANTWERPEN X - Viermaandelijks - Drukwerk aan verminderd tarief

€ 12,39 — US\$ 14

■ *The New Organ in Brussels Cathedral*

■ *The 28<sup>th</sup> AIO Congress in Boston: October 2001*

■ *Organ Building in Norway during the Romantic and Neo-classical Eras*

Number 12

November 2001

Deutsch — Français — English

# ISO Journal

## Analyse acoustique du transitoire d'attaque des tuyaux à bouche Sons de bouche et sons de biseau (*Fin*)

Michèle Castellengo

Dieser Artikel erschien in Englisch in *Acta Acoustica* (Nr. 3, Mai/Juni 1999) und wird hier mit der freundlichen Zustimmung von S. Hirzel Verlag abgedruckt. Der erste Teil erschien im *ISO Journal* Nr. 10, März 2001, und der zweite Teil im *ISO Journal* Nr. 11, Juli 2001

**Akustische Analyse von Einschwingvorgängen bei flötenähnlichen Instrumenten: Mundtöne und Schneidentöne (Schluss)**

### 5 Mundtöne und ästhetische Konzeptionen

#### 5.1 Blockflöten

Mundtöne sind die Würze des Flötenklanges. Bei diesem Instrument kann der Musiker den Klang nur verändern, indem er den Druck am Mundstück variiert. Der mittlere statische Druck, mit welchem die exakte Tonhöhe erreicht wird, muss mit Präzision erzeugt werden. Doch die verschiedenen Wege, auf denen dieser Druck erreicht werden kann, sind eine Ursache für verschiedenartigste Variationen, wenn die musikalische Qualität des Mundstückes diese erlaubt. Nachdem der Flötenspieler verschiedene Typen des Zungenstoßes erlernt hat, kann er während des Ansprache-Einschwingvorganges eine Vielzahl von Klangfarben entstehen lassen. Von daher wird es verständlich, dass die Kunst des Flötenspielers, wie sie in den alten Lehrbüchern gelehrt wird [33], zuallererst eine Kunst des Zungenstoßes ist, die auf der Artikulation von Konsonanten basiert wurde. Dies ist eine hervorragende Methode, die Regulierung der Druckkurven und der Druckaufbau-Zeit zu erlernen. Abbildung 14 zeigt drei verschiedene Zungenstoße der Experimentier-Blockflöte, welche jeweils den Konsonanten *He*, *De* und *Te* entsprechen. Die im Mund des Musikers gemessenen Druckkurven sind im oberen Teil der Abbildung 14 dargestellt. Im unteren Teil sieht man die Zeiten für das Einsetzen der Obertöne und die Zeit/Frequenz-Darstellungen für die vom

This paper, first published in English in *Acta Acoustica* (No. 3, May/June 1999) is published here with the kind permission of S. Hirzel Verlag. The first part is published in *ISO Journal* No. 10 of March 2001 and the second in *ISO Journal* No. 11 of July 2001

**Acoustical analysis of initial transients in flute like instruments: Mouth sounds and edge tones (Final part)**

### 5 Mouth tones and aesthetic conceptions

#### 5.1 Recorders

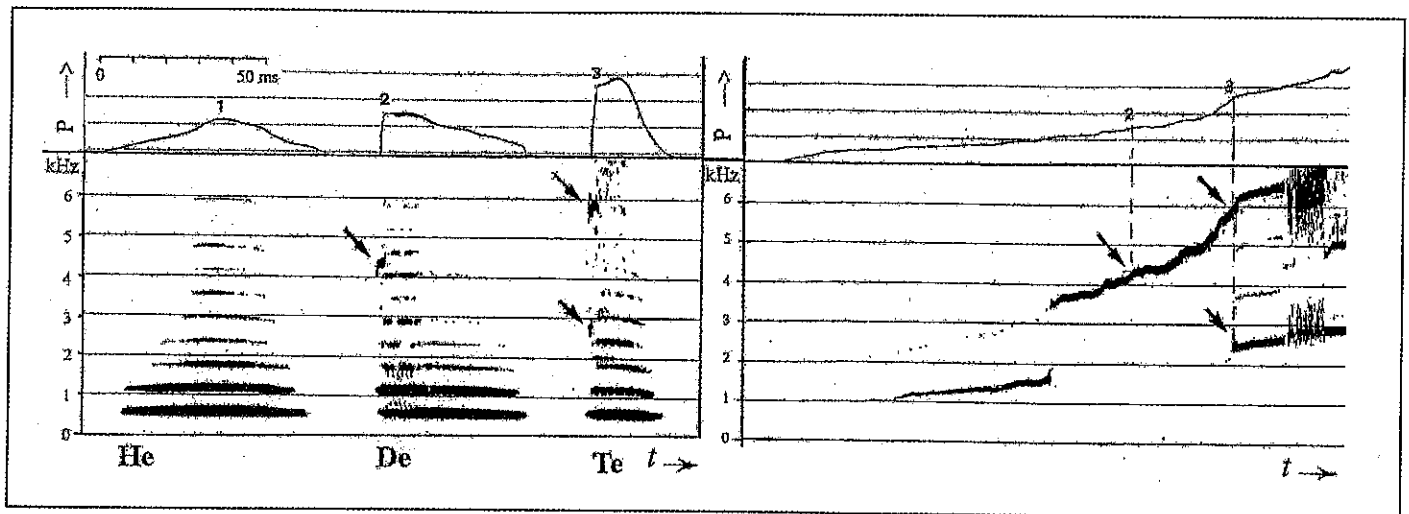
Mouth tones give spice to the sound of recorders. On this instrument, the musician can only modify the sound by modifying the pressure in the mouth. Whereas the mean static pressure that adjusts the tone pitch must be realised with precision, different ways to reach this pressure give rise to all sorts of variants whenever allowed for by the musical quality of the mouth. After learning several types of tonguing, the recorder player may produce a great variety of timbres during the attack transients. It becomes thus understandable that the art of recorder playing, as taught in the old treatises [33], is first of all an art of tonguing based on uttering consonants. As a matter of fact, this is an excellent method for learning to adjust the shape and the rise time of the pressure build-up. Figure 14 presents three different tonguings on the experimental recorder, corresponding to consonants *He*, *De* and *Te* respectively. The pressure curves measured in the mouth of the musician are plotted in the upper part of Figure 14. The arrival times for the harmonics and the mouth noises are displayed on time/frequency plots below. *Te* is a fast transient with a high pressure peak, and *De* is softer. The mouth tone corresponding to *Te* is also higher in pitch than the mouth tone

Ce papier, paru en anglais dans *Acta Acoustica* (N°3, Mai/Juin 1999), est publié ici avec l'aimable concours de l'éditeur S. Hirzel Verlag. La première partie est parue dans *ISO Journal* N°10 de Mars 2001, et la deuxième partie dans *ISO Journal* N°11 de Juillet 2001

### 5 Les sons de bouche et l'esthétique sonore.

#### 5.1 Flûte à bec

Les sons de bouche sont le "piment" acoustique du son des flûtes à bec. Sur cet instrument, le musicien a pour seul paramètre d'action sur le son, la variation de pression à l'entrée du bec. Si la pression statique moyenne — celle qui règle la justesse du son — doit être réalisée très précisément, la façon d'y parvenir peut donner lieu à toutes sortes de variantes, pour peu que l'embouchure soit d'assez bonne qualité musicale pour s'y prêter. En s'appropriant plusieurs sortes d'articulations le joueur de flûte à bec peut produire de grandes variétés de timbre au moment du transitoire d'attaque. On comprend que l'art du jeu de la flûte à bec enseigné dans les traités anciens [33] soit avant tout un art du "coup de langue", basé sur la prononciation des consonnes de la langue parlée. C'est de fait un excellent moyen pour apprendre à régler la forme et le temps de montée de la pression pour jouer le son. Nous présentons dans la Figure 14 trois exemples d'articulation joués avec notre flûte à bec expérimentale, qui correspondent successivement aux consonnes *He*, *De* et *Te*. La courbe de montée en pression, prise dans la bouche du musicien, est représentée à la partie supérieure de la figure. Le sonagramme permet d'analyser l'arrivée des harmoniques et les bruits de bouche. *Te* est une attaque rapide avec un pic élevé de pression alors que *De* est plus doux. Le son de bouche du *Te* est aussi plus aigu que celui du *De*. Il apparaît enfin que l'attaque très graduelle obtenue avec *He*



**Figure 14**

Alto Recorder No. 1: spectral analysis. Left: complete flute ( $\mathcal{A}+\mathcal{B}$ ) played by a musician. The note (fingering D5) is repeated three times with three different tonguings, *He*, *De* and *Te*. Right: edge tones for part  $\mathcal{A}$  alone, played with increasing pressure. Arrows indicate the frequencies corresponding to the initial pressures 2 and 3 of tonguings *De* and *Te* from the left hand side.

Flûte à bec N°1: analyses spectrales. A gauche, flûte ( $\mathcal{A}+\mathcal{B}$ ) jouée par un musicien (doigté Ré4) avec trois coups de langue différents: *He*, *De* et *Te*. A droite: son de bouche de la partie  $\mathcal{A}$  isolée produit par pression croissante (cf. Figure 5). Les flèches montrent les correspondances entre les fréquences des sons de bouche (*Te* et *De*) et les fréquences du son de biseau correspondant aux valeurs 2 et 3 de la pression du transitoire.

Altblockflöte Nr. 1: Spektralanalyse. Links: komplette Flöte ( $\mathcal{A}+\mathcal{B}$ ), von einem Musiker gespielt. Der Ton (Fingersatz für D5) wird drei Mal mit unterschiedlichen Zungenstößen wiederholt: *He*, *De*, *Te*. Rechts: Schneidentöne für das separate Mundstück ( $\mathcal{A}$ ), welches mit ansteigendem Druck gespielt wurde. Pfeile weisen auf die Frequenzen hin, welche den Ausgangs-Druckwerten 2 und 3 von den Zungenstößen für *De* und *Te* auf der linken Abbildung entsprechen.

Mundstück erzeugten Geräusche. *Te* erzeugt einen schnellen Einschwingvorgang mit einer markanten Druckspitze; *De* ist weicher. Der zu *Te* gehörige Mundton hat eine höhere Frequenz als der zu *De* gehörige. Und schließlich werden durch den sehr allmählich verlaufenden Ansprache-Einschwingvorgang, welcher mit *He* erreicht wird, die Mundtöne unterdrückt, wie schon in Abbildung 13a (Seite 51, *ISO Journal N° 11*) sichtbar wurde: die Klangfarbe der Blockflöte wird beachtlich verändert. Nachdem der Pfeifenkörper entfernt wurde, wurden Schneidentöne mit dem separaten Mundstück (Teil  $\mathcal{A}$ ) erzeugt, indem ein stetig steigender Druck angewendet wurde. Die Ausgangs-Druckwerte für *De* und *Te* sind an den Druckkurven für Teil  $\mathcal{A}$  markiert (Punkte 2 und 3). Wie zu erwarten war, sind die Frequenzen der Schneidentöne gleich denen der Mundtöne für die *De*- und *Te*-Zungenstöße (Pfeile in Abbildung 14).

## 5.2 Orgeln

Seit Jahrhunderten wird die Intonation von Orgeln heftig diskutiert. Die Kunst der Regulierung von

corresponding to *De*. Lastly, the very progressive attack transient obtained with *He* eliminates mouth tones, as was already noticed in Figure 13a (page 51, *ISO Journal N° 11*): it considerably alters the sound colour of the recorder. After taking apart the body, edge tones were produced on the mouth piece only, (part  $\mathcal{A}$ ), using a steadily increasing pressure. Initial pressure values for attacks *De* and *Te* are marked on the pressure curves for part  $\mathcal{A}$  only (points 2 and 3). As one can expect, edge tone frequencies are similar to the mouth tone frequencies from attacks *De* and *Te* (arrows in Figure 14)

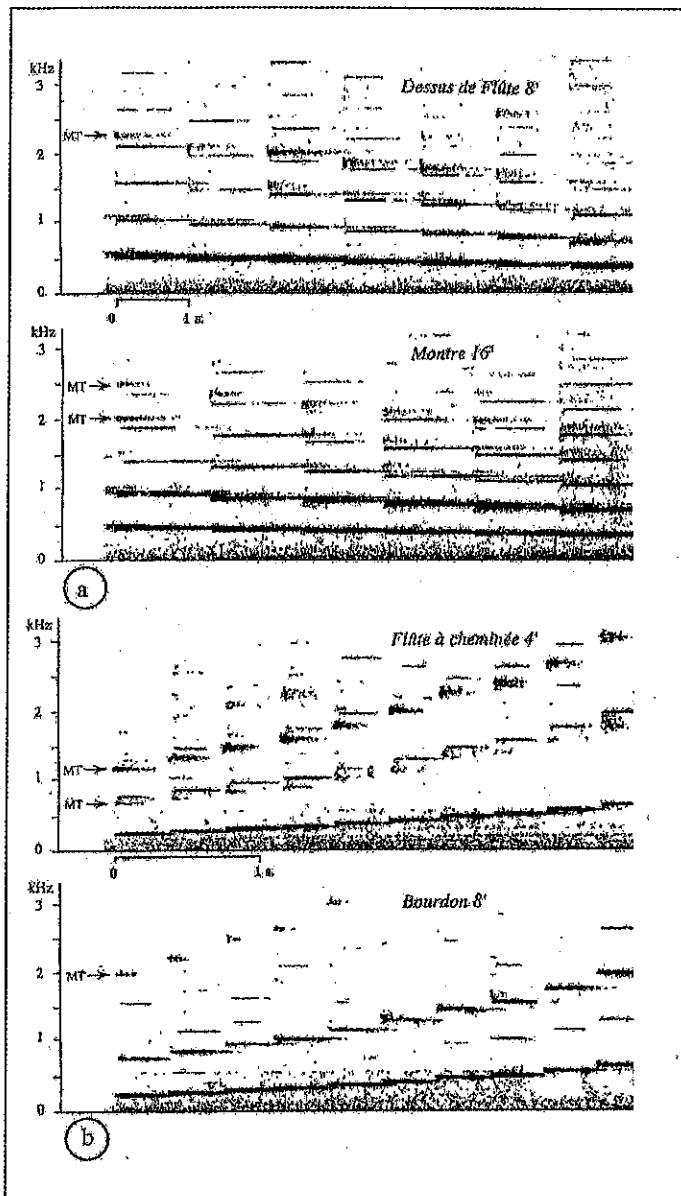
## 5.2 Organs

Voicing organs has been a matter of heavy discussions for centuries. The art of adjusting attack transients for organ pipes must be considered in the perspective of auditory perception and musical aesthetics. Relying on his hearing, the voicer does not adjust basses like uppers. In a similar way, transients for solo stops and transient for combined stops are balanced differently. For

permet d'éliminer les sons de bouche comme nous l'avons déjà observé dans la Figure 13a (page 51, *ISO Journal N° 11*), donc de changer considérablement la sonorité de la flûte. La bouche de l'instrument (partie  $\mathcal{A}$ ) ayant été isolée, nous avons pu produire le son de biseau avec une pression régulièrement croissante. Les valeurs de la pression initiale pour les attaques *De* et *Te* ont été repérées sur la courbe de pression produite avec la partie  $\mathcal{A}$  seule (points 2 et 3). A ces valeurs correspondent, comme on peut s'y attendre, des fréquences du son de biseau analogues à celles des sons de bouche des attaques *De* et *Te*, désignées par des flèches sur la figure.

## 5.2 L'orgue

On sait les discussions que peuvent provoquer certaines harmonisations d'orgue. L'art du réglage d'un transitoire d'attaque de tuyau d'orgue doit être appréhendé en fonction de la perception auditive et de l'esthétique musicale. Se fondant sur les propriétés de l'oreille, l'harmoniste n'opère pas les mêmes réglages dans les basses et dans les des-



**Figure 15**

Analysis of four organ stops remarkable for their inharmonic mouth sounds at the transients. The arrows indicate the principal mouth sounds of the first note.

- a Isnard organ (1774) Saint-Maximin du Var: fragments of descending chromatic scales. Montre 16 (great organ): first note is the 5th C on keyboard; Dessus de Flûte 8 (positive organ: first note is the 4th D on keyboard.
- b Chamber organ by Ph. Hartman, Paris: fragments of ascending diatonic scales. Flûte à cheminée 4: First note is the 4th C on keyboard; Bourdon 8: first note is the 3rd C on keyboard. In this compass, the latter stop consists in chimney pipes.

Analyse sonographique de quatre jeux d'orgue remarquables pour leurs sons de bouche inharmoniques aux transitoires. Les flèches indiquent les principaux sons de bouche de la première note.

- a Orgue Isnard (1774) de Saint-Maximin du Var. Fragment de gamme chromatique descendante; Montre 16 du GO (1ère note=5ème Do); Dessus de flûte 8 du positif (1ère note=4ème Ré).
- b Orgue de salon de Ph. Hartman. Gamme diatonique ascendante: Fragment de Flûte à cheminée 4 (1ère note=4ème Do); Bourdon 8 (1ère note=3ème Do). Cette partie du Bourdon 8 est construite avec une cheminée.

Analyse einzelner Orgelregister, welche wegen ihrer unharmonischen Schneidentöne während des Ansprache-Einschwingvorganges bemerkenswert sind. Die Pfeile weisen auf die wichtigsten Schneidentöne der ersten Note hin.

- a Isnard-Orgel (1774) in Saint-Maximin du Var: Fragmente von absteigenden chromatischen Tonleitern. Montre 16' (Hauptwerk): der erste Ton ist C3 am Spieltisch; Dessus de flûte 8' (Positiv): der erste Ton ist D2 am Spieltisch.
- b Hausorgel von Ph. Hartman, Paris: Fragmente von aufsteigenden diatonischen Tonleitern. Flûte à cheminée 4': der erste Ton ist C2 am Spieltisch; Bourdon 8': der erste Ton ist C1 am Spieltisch. Der gezeigte Tonumfang des Bourdon besteht aus Pfeifen mit einem Rohraufsatz.

Ansprache-Einschwingvorgängen für Orgelpfeifen muss unter der Perspektive der auditiven Wahrnehmung und der musikalischen Ästhetik betrachtet werden. Indem er sich auf sein Gehör verlässt, intoniert der Intonateur Basspfeifen anders als Diskantpfeifen. Gleichmaßen werden Einschwingvorgänge für Soloregister anders ausbalanciert als solche für Begleitregister. In romantischen Orgeln, wo sich die Register besonders gut mischen sollen, müssen die Mundtöne zum Verschwinden gebracht werden. Deshalb haben sich die Intonateure angewöhnt, den Kern mit Kernstichen zu versehen. Andererseits besteht der besondere Charme von einigen Rohrflöten und gedeckten Registern darin, dass die Einschwingvorgänge sehr kurz und die Mundtöne auf subtile Weise

romantic organs where stops must blend together, mouth tones must disappear and voicers have taken the habit to cut small nicks in the flue. On the other hand, some stopped-pipes and chimney pipes take their particular charm from the very brief transients and the subtle inharmonicity of their mouth tones.

Under contract from the French Ministry of Culture, we have studied many historic organs registered as national treasures. We have noticed the importance that the mouth tones play for the precision and the sound quality of the attack transients of these instruments. For example, Figure 15 exhibits the spectrum of a few notes from two stops of the Isnard organ (1774) at Saint-Maximin-du-Var (France). The attack

sons. De même il dosera différemment les transitoires des jeux solistes et ceux des jeux de mélange. Les jeux d'un orgue de style romantique, conçus pour se fondre dans le mélange doivent perdre leurs sons de bouche, d'où la pratique des "dents", petites incisions dans la fente de la lumière. A l'opposé, le charme particulier de certains bourdons ou tuyaux à cheminée réside dans l'attaque brève et subtilement inharmonique de leurs sons de bouche.

Dans le cadre des études que nous réalisons pour le Ministère de la Culture nous avons analysé un grand nombre d'orgues de très grande valeur, classés Monuments Historiques, et nous avons toujours constaté le rôle important joué par les sons de bouche du transitoire

unharmonisch sind.

Im Auftrag des französischen Kulturministeriums haben wir viele historische, unter nationalem Denkmalschutz stehende Orgeln studiert. Wir stellten die Bedeutung von Mundtönen für die Präzision und die Klangqualität von Ansprache-Einschwingvorgängen bei diesen Instrumenten fest. Beispielsweise wird in Abbildung 15 das Spektrum einiger Noten von zwei Registern der Isnard-Orgel von 1774 in Saint Maximin du Var (Frankreich) dargestellt. Die Ansprache des Registers *Dessus de Flûte 4'* weist Geräusche des Pfeifenmundes auf, welche den 4. Partialton der Pfeife treffen, der sich leicht über dem 4. Oberton befindet. Komplexere Geräusche des Pfeifenmundes nahe dem 4. und 5. Oberton findet man im Register *Montre 16'*. Letzteres weist auch viel hochfrequentere Ansprachegeräusche zwischen ca. 4000 und 5000 Hz auf [34]. Es sei darauf hingewiesen, dass bei diesen beiden Registern der wichtigste Mundton als schmales Geräuschband während der gesamten Tondauer erhalten bleibt. In Kirchen aufgenommene Analysetöne liefern wegen des Abstandes zwischen Mikrofon und Instrument und wegen des Nachhalls keine akkuraten Mundtöne. Darüber hinaus variieren Mundtöne statistisch über mehrere Noten hinweg. Will man diese Streuung zeigen, so muss man die Zeitskala zusammendrängen, was die Töne auf unserem Sona-Graph oft komplett zum Verschwinden bringt.

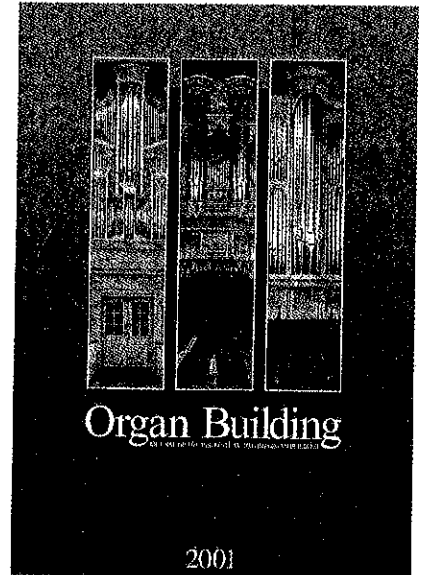
In Abbildung 15 sind zwei weitere Analysen dargestellt, welche eine kleine Hausorgel von Ph. Hartmann betreffen. Beachten sie die sehr intensiven Mundtöne der *Flûte à cheminée 4'* (Rohrflöte), mit Frequenzen knapp unterhalb des 5. Obertones: das Ganze klingt wie Glöckchen. Es ist deswegen von höchster Wichtigkeit, die Frequenzen des Mundtones präzise von denen des 5. Obertones zu unterscheiden. Die zweite Serie von Mundtönen, die sich unterhalb des 3. Obertones befindet, sind Differenztöne: die entstehen, wenn der Grundton einsetzt. Bei der gleichen Tonhöhe sind die Pfeifen des *Bourdon 8'* allerdings und nur in diesem Tonbereich als Rohrflöten gebaut. Diese haben aber andere Mensuren als die *Flûte à cheminée 4'*. Die Mundtöne befinden sich zwischen dem 7. und dem 8. Oberton. An diesem kleinen Instrument, dessen Klaviatur über einen sensiblen Anschlag verfügt, sind die Mundtöne ausgeprägter, wenn präzise

# Organ Building

JOURNAL OF THE INSTITUTE OF BRITISH ORGAN BUILDING

The Institute of British Organ Building has launched a new annual publication that will be essential reading for anyone with an interest in the organ, its construction and its music.

Celebrating the fifth anniversary of the IBO 'Organ Building' explores a wide range of topics and highlights the best in domestic and international British organ building including .....



## New Organs

In-depth reviews of seven new projects illustrated with color photographs, pipe scales and drawings

## Olivier Latry

The french master talks candidly on voicing and design

## Conservation

The historic aspects of some recent projects explored

## The Review of the Year

Organbuilding activity during 2000

## The Complete IBO Register of British Builders

Order your copy online at  
[www.ibo.co.uk](http://www.ibo.co.uk)  
for immediate delivery  
(Prices including delivery detailed by region on website)

The IBO 63 Colebrooke Row London N1 8AB United Kingdom  
Tel/Fax: +44 20 7689 465 email: administrator@ibo.co.uk

of the *Dessus de Flûte* stop displays mouth noise that hits the 4<sup>th</sup> partial of the pipe, slight above the 4<sup>th</sup> harmonic. More complex mouth noises, close to the 4<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> harmonics, are found for the *Montre 16'* stop. The latter also presents much higher pitch attack noises, around 4000 and 5000 Hz [34]. Notice that in these two stops, the main mouth tone subsists during the steady tone as a narrow band of noise. Analysing tones recorded in a church do not accurately account for mouth tones, due to the distance between the

d'attaque dans la netteté et dans la qualité musicale du son de ces instruments. A titre d'exemple nous présentons (Figure 15) l'analyse de quelques notes de deux jeux de l'orgue Isnard (1774) de Saint-Maximin du Var (France). L'attaque du *Dessus de Flûte* possède un bruit de bouche assez régulier qui accroche le partiel 4 du tuyau, plus aigu que l'harmonique 4. Les bruits de bouche de la *Montre 16'*, plus complexes, sont voisins des harmoniques 4 et 5. La *Montre* possède aussi des bruits d'attaque beaucoup plus aigus, vers 4000 et 5000 Hz [34]. On remarque-

und abgesetzt gespielt wird. Auch die Spektren verändern sich beim Legato-Spiel. Es ist sehr wahrscheinlich, dass zu intensive Mundtöne das Einsetzen von einigen Obertönen behindern.

So wie die Schneidentöne reagieren auch Mundtöne sehr sensibel auf die geringfügigen Druckveränderungen, welche bei repetierten Noten in der Tonkanzelle stattfinden. Das menschliche Ohr nimmt sofort die Veränderungen der Klangfarbe war, wenn ein Mundton auf einen höheren oder tieferen Teilton trifft. Der Klang von Orgelpfeifen, welche in barocker Art und Weise intoniert wurden, wird deswegen auf sehr unvorhersehbare Weise belebt. Wenn, wie einige es sich wünschen, der Organist eine totale Kontrolle über die Ansprache-Einschwingvorgänge hätte, dann müssten nicht nur die Ventile mit einem Öffnungssystem ausgestattet sein, welches vom Spieltisch aus ganz genau kontrolliert werden kann, sondern es müsste auch und vor allem jede Tonkanzelle mit einer unabhängigen Windversorgung ausgestattet sein.

## 6 Schlussbemerkung

Eine komplette Beschreibung der Ansprache-Einschwingvorgänge muss nicht nur die aufeinander folgenden Zeitpunkte des Einsetzens der Obertöne und deren Amplituden beinhalten. Dieses Phänomen wurde fast ausschließlich in vorhergehenden Studien untersucht. Die Beschreibung muss auch den Klang einschließen, welcher durch das im Pfeifenmund wirksame Erregungssystem entsteht. Dieser spielt eine wichtige Rolle bei der qualitativen Einschätzung des Einschwingvorganges. Mundtöne gehen dem Aufbau des regulären Klangzustandes von Lippenpfeifen voraus. Von ihren Formen und ihren Frequenzinhalten hängt sowohl die Gesamtdauer des Einschwingvorganges wie auch manchmal der Inhalt des Spektrums des stabilen Klangzustandes ab. Das Fortbestehen von Mundtönen während der normalen Funktionsweise der Pfeife, welche bis jetzt der Aufmerksamkeit der Theoretiker entgangen war, ist eine durch die musikalische Praxis bestätigte Tatsache. Die Theorie über Labialpfeifen muss nun solche Beobachtungen mit einbeziehen.

## Dank

Die Autorin dankt A. Hirschberg für seine ermutigenden und kritischen Diskussionen,

microphone and the instrument, and due to the reverberation. Moreover, mouth tones vary statistically over several notes, and the compressed time scale, necessary to display such a scattering, often wipes it off completely on our Sona-Graph.

Two other analyses are presented in Figure 15 concerning a small chamber organ made by Philippe Hartman. Notice the very intense mouth tones of the *Flûte à cheminée 4'* (chimney pipe), with frequencies just below the 5<sup>th</sup> harmonics: the whole tinkles like small bells. It is therefore of the utmost importance to precisely discriminate the mouth tone frequency from the 5<sup>th</sup> harmonic. The second series of mouth tones, located below the 3<sup>rd</sup> harmonics, are difference tones produced when the fundamentals set in. At the same pitch, the tones from *Bourdon 8'* are in fact, in this part of the compass, produced by chimney pipes which have different ratio than the *Flûte à cheminée 4'*. Mouth tones are located between the 7<sup>th</sup> and the 8<sup>th</sup> harmonics. On this small instrument with a touch sensitive keyboard, mouth tones are more prominent when playing precisely and detached. Spectra are also modified when playing legato. Most likely, too intense mouth tones are hindering the onset of some harmonics.

Just like edges tones, mouth tones are very sensitive to the very small pressure variations that take place in the note channel when a given note is repeated. The human ear immediately notices changes in sound colour when a mouth tone hits a higher or a lower partial. The sound of organ pipes voiced according to the baroque style is thus enlivened in a highly unpredictable manner. If, as some wish it, the organist should have complete control over the attack transients, not only the pallets should be equipped with an opening system very accurately controlled by the keyboard, but also and above all, they should be fed with independent air supplies.

## 6 General conclusion

A complete description of the attack transients of flue pipes must not only take into account the successive arrival times of the harmonics and their ampli-

ra que pour ces deux jeux, le son de bouche principal persiste dans le son stationnaire, sous forme d'une bande de bruit étroite. L'analyse des sons enregistrés dans une église ne rend pas toujours bien compte des sons de bouche en raison de la distance à l'instrument et de la réverbération. Si l'on veut par ailleurs montrer l'allure statistique des sons de bouche sur plusieurs notes, on doit adopter une échelle de temps comprimée qui les fait parfois disparaître.

Deux autres analyses sont présentées Figure 15. Il s'agit d'un petit orgue de salon construit par Philippe Hartman. On observera avec intérêt les sons de bouche de la *Flûte à cheminée 4'*, très intenses, dont la fréquence est plus basse que celle de l'harmonique 5 produisant un effet de "clochette" à l'attaque. Il y a donc bien lieu de discriminer par une analyse précise, la fréquence du son de bouche de celle de l'harmonique 5. La deuxième série de sons de bouche située au dessous de l'harmonique 3 est un son différentiel se produisant à l'arrivée du fondamental. Les sons du *Bourdon 8'* sont en fait produits, dans cette partie du clavier, par des tuyaux à cheminée de proportion différente. Les sons de bouche sont situés entre l'harmonique 7 et l'harmonique 8. Sur un petit instrument au toucher sensible, les sons de bouche sont plus importants avec un jeu précis et détaché. Nous avons observé que le spectre des tuyaux se modifie dans le jeu legato. Il est possible que les sons de bouche trop intenses gênent l'établissement de certains harmoniques.

Comme les sons de biseau, les sons de bouche sont sensibles aux très petites variations de pression qui se produisent dans la gravure d'un orgue lors de la répétition d'une note. L'oreille repère immédiatement le changement de sonorité que produit l'accrochage d'un partiel plus aigu ou plus grave. Les tuyaux d'orgue harmonisés dans le style "baroque" acquièrent ainsi une vie sonore largement imprévisible. Si comme d'aucuns le souhaitent, on veut donner à l'organiste le contrôle complet du transitoire d'attaque, il faut non seulement équiper la soupape d'un système d'ouverture asservi très précisément au mouvement de la touche, mais aussi, et surtout, fournir chaque tuyau avec une alimentation d'air indépendante.

welche zur vorliegenden Arbeit führten; X. Boutillon, B. Fabre, V. Gibiat, M. P. Verge, C. Valette und J.-D. Polack für ihre befruchtenden Anmerkungen nach der aufmerksamen Lektüre des Manuskripts.

Übersetzung: Annett Jehmlich

**Bibliography / Bücherverzeichnis / Références Bibliographiques**

- 33. Ganassi S., (1535) — Opera intitulata Fontegara, la quale insegna a sonare di flauto, Venise, Fac simile, Bollet/ Bibl. mus., Milano (1934).
- 34. Castellengo M. (1977) Analyses spectrographiques de quelques jeux d'un orgue, La revue Musicale, Paris, 295-296, p 103-111.

**Remerciements**

L'auteur remercie A. Hirschberg dont les encouragements et les discussions critiques ont permis l'aboutissement de ce travail. Sa reconnaissance va également aux collaborateurs : X. Boutillon, B. Fabre, V. Gibiat, C. Valette, M. P. Verge et J.-D. Polack qui ont relu attentivement le manuscrit, et dont les remarques ont permis d'éclaircir bien des points.

tude rise times, which have been almost exclusively studied in previous publications, but also the sound produced by the excitation system operating in its mouth regime, which plays a major role in the qualitative appreciation of the transients. Mouth tones precede the build-up of the regular regime of the flue pipe. Upon their shapes and their frequency contents depend the total durations of the transients, as well as, sometimes, the spectral contents of the steady state sounds. The survival of mouth tones during the regular regime, which until now has escaped the attention of theoreticians, is a fact attested by musical practice. Flue pipe theory must now account for such observations.

**Acknowledgements**

The author thanks A. Hirschberg for his encouraging and critical discussions that led to the present work; X. Boutillon, B. Fabre, V. Gibiat, M. P. Verge, C. Valette and J.-D. Polack, who attentively read the manuscript and for their fruitful remarks.

Translation: Jean-Dominique Polack

**6 Conclusion finale**

La description complète du transitoire d'attaque d'un tuyau à bouche doit prendre en compte non seulement les phénomènes relatifs à l'ordre d'arrivée des harmoniques et à leur temps d'établissement en amplitude, phénomènes sur lesquels ont porté essentiellement les travaux antérieurs, mais aussi les productions sonores dues au fonctionnement du système exciteur en mode "buccal", dont on a vu l'importance primordiale dans l'appréciation qualitative du transitoire. Les sons buccaux précèdent l'établissement du régime de fonctionnement "normal" du tuyau à bouche. Leur développement, leur contenu fréquentiel ont une incidence sur la durée totale du transitoire et quelquefois sur le contenu spectral du son stationnaire. La coexistence des sons buccaux pendant le régime normal — coexistence qui pose certes de difficiles problèmes quand à la nature de l'oscillation du jet — est un fait observable, exploité en musique. Une théorie satisfaisante du fonctionnement d'un tuyau à embouchure de flûte devrait pouvoir rendre compte des comportements acoustiques observés.

Michèle Castellengo



**Registerschildchen aus Porzellan**

- für Neubau und Restaurierungen in verschiedenen Formen und Größen
- in jeder Schriftform und/oder mit farbigem Untergrund und Goldrand
- Anfertigung von Kopien
- Restaurierung von Plättchen, Schrift- und Goldrand-Erneuerung, Schriftentfernung und Umschreiben von Originalplättchen
- Bearbeitung gegen Zuschlag von Porzellan und Milchglas auf das Maß
- Schilder aus Milchglas und anderen Materialien
- individuelle Firmenschilder in Einzelanfertigung
- keine Mindestbestellmenge

**Fragen sind erwünscht**

**Gerd Schuster**  
 Migennesstrasse 8  
 D-55469 Simmern (Deutschland)  
 Tel +49 6761 5771  
 Fax +49 6761 962556

**ISO** Journal is an excellent forum in which you can present your experiences, share your opinion or notify the organ world of upcoming events. We encourage all our readers to give us the benefit of their knowledge. To submit material for publication, please contact the ISO Editor.

**ISO** Journal is an excellent forum to present your experiences, share your opinion or notify the organ world of upcoming events. We encourage all our readers to give us the benefit of their knowledge. To submit material for publication, please contact the ISO Editor.

**ISO** Journal est une excellente tribune pour faire part de votre expérience, faire partager vos point de vue ou faire connaître au monde de l'orgue les événements à venir. Nous invitons tous nos lecteurs à nous transmettre leur savoir et leurs informations. Pour proposer des articles à la publication, veuillez prendre contact avec l'éditeur de l'ISO.