

Mémoire de DEM-E.N.M.D. de Bourg-la-Reine/Sceaux

Anne-Emmanuelle Abrassart

Acoustique de la flûte à bec

Modélisation et expériences d'analyse spectrale

2001/2002

TABLE DES MATIERES

Introduction.	Page : 1
PARTIE A	
I-Ondes acoustiques dans un tuyau sonore.	2
I-0. Résumé de ce paragraphe.	2
I-1. Equation des tuyaux sonores.	4
I-1.1. Notations utilisées.	4
I-1.2. Modélisation de l'air.	5
I-1.3. Equation du mouvement de la tranche de gaz.	5
I-2. Solution de l'équation.	6
I-2.1. Solution générale.	6
I-2.2. Système d'ondes stationnaires sinusoïdales.	7
I-2.3. Nœuds et ventres de déplacement et de pression.	8
I-2.4. Tuyau ouvert à une extrémité.	8
I-2.5. Tuyau ouvert aux deux extrémités.	9
I-3. Application et critiques.	10
I-3. 1. Emission des sons.	10
I-3.2. Réglages d'une flûte.	11
I-3.3. Critique du modèle.	12
II-Analyse harmonique.	13
II-1. Bruits et sons.	13
II-2. Spectre d'un son.	13
II-2.1. Décomposition en série de Fourier.	
II-2.2. Spectre du signal.	
II-2.3. Exemples de décomposition en série de Fourier.	
II--3. Hauteur d'une note.	16
II-4. Timbre d'un instrument.	16
II-5. Attaques, turbulence...	17
PARTIE B	
Objectif et protocole expérimental.	18
I- Forme des ondes.	19
I-1. Importance du fondamental.	19
I-2. Effet de battements.	20
II- Harmoniques de la flûte à bec.	22
III- Evolution du spectre lors d'un chromatisme.	23
IV- Mise en évidence de la différence entre les registres.	25
V- Influence de la position de la bouche sur le timbre.	26
V-1. Evolution du spectre en fonction de la position du palais.	26
V-2. Présentation et reproduction de l'expérience de Dan Laurin.	28
VI- Mise en évidence des différentes attaques.	35
Conclusion.	38
ANNEXE 1 : Notions succinctes sur les gammes.	39
ANNEXE 2 : Mesures d'intensité acoustique en dB.	41
Bibliographie.	42

Remerciements

Je remercie Julien Le Bars, professeur agrégé de physique en classe de mathématiques supérieures pour son aide et ses conseils, Philippe Bolton, facteur de flûtes à bec qui a réponse à tout et qui a toujours été disponible sur Internet pour répondre à mes interrogations, Jean Noël Catrice, mon professeur de flûte à bec qui en me prêtant l'article de Michèle Castellengo m'a donné l'idée de réaliser ce travail.

Introduction

Les physiciens et les mathématiciens ont depuis longtemps cherché à rationaliser les sensations et la production des sons musicaux, à expliquer l'origine des consonances, harmonies et effets de timbres, à décrire les phénomènes vibratoires par des lois simples. De nombreux physiciens et théoriciens se sont donc intéressés à l'acoustique musicale. Parmi eux, on trouve de grands noms tels Pythagore, Zarlin, Ohm, Savart, Fourier, Helmholtz...

Pour ma part, ayant poursuivi des études de physique avant de me consacrer entièrement à la musique, j'ai eu envie de réaliser un travail réunissant ces deux centres d'intérêt. C'est donc naturellement que je me suis intéressée à l'acoustique de mon instrument : la flûte à bec.

Dans une première partie, je tenterai de réaliser un modèle succinct du principe d'émission sonore à l'aide d'une flûte à bec en me basant sur les notions d'acoustique acquises lors de mes études scientifiques. Ce modèle simple, limité à des connaissances mathématiques de premier cycle universitaire, ne donnera qu'une idée très approximative de la réalité des phénomènes mis en jeu. En effet, comme le souligne E.Leipp¹ « les « vrais » physiciens, comme Bouasse, qui se sont attaqués aux problèmes de l'acoustique musicale, ont rapidement constaté de leur côté qu'il ne pouvait, par exemple, être question d'appliquer aux instruments de musique les lois élémentaires de la physique et qu'il fallait se contenter d'observer l'allure des phénomènes si l'on ne voulait pas se fourvoyer de paradoxe en paradoxe ». C'est en suivant cette recommandation que je poursuivrai mon travail par une partie expérimentale s'appuyant sur l'analyse spectrale des sons produits par mon instrument.

Cependant le terme d'analyse spectrale est ambigu, l'acoustique est une science et la musique est un art, aussi, même si l'acoustique permet d'améliorer certaines pratiques musicales (technique instrumentale, création et amélioration d'instruments, méthodes d'enregistrement...), il faut garder à l'esprit que l'expression artistique repose avant tout sur la sensibilité du musicien, ses années de pratique et sur l'expérience et le savoir faire des facteurs d'instruments.

Par ailleurs, notons que l'acoustique musicale est en développement permanent, mais les travaux actuels exigent une grande spécialisation. Il m'a donc semblé plus raisonnable de me limiter pour ce mémoire à une étude modeste, compatible avec mes connaissances et que je peux appréhender dans sa globalité. En particulier j'ai choisi de ne pas aborder les problèmes de dynamique des fluides, phénomènes d'enroulements et de tourbillons dont on sait qu'ils sont parmi les plus difficiles de la physique. Je n'étudierai donc, dans la première partie, que le corps résonant sans me pencher sur le problème du système exciteur.

Dans la partie expérimentale, indépendante de la partie théorique, j'étudierai certaines caractéristiques des sons émis par la flûte à bec : Caractéristiques du spectre, influence des doigtés sur celui-ci, modification du timbre et du spectre en fonction de la forme de la cavité buccale et mise en évidence des différentes attaques.

Pour le lecteur peu coutumier du formalisme mathématique, je commencerai par décrire sans formalisme le cheminement de pensée du paragraphe I de la partie A, il sera alors possible de passer directement à la lecture de la partie expérimentale après ce résumé .

¹ voir bibliographie [E.Leipp] p5

I-Ondes acoustiques dans un tuyau sonore.²

Le but de cette partie est d'analyser simplement le principe d'émission sonore par une flûte et de comprendre les mécanismes permettant d'émettre une note juste à l'aide de cet instrument.

I-0. Résumé de ce paragraphe.

Pour expliquer l'émission de notes à l'aide d'une flûte et la façon de choisir la hauteur du son joué on doit expliquer ce qu'est un son, comment il est émis, quelles sont ses caractéristiques et comment le contrôler. Pour cela il faut rappeler qu'un son est produit par une mise en vibration de l'air. Les tympanes sont mis en mouvement par une différence de pression entre l'air extérieur et l'oreille interne, ce mouvement étant interprété par le cerveau comme un son. On doit donc déterminer comment mettre en mouvement l'air et comment ce mouvement imprimé en un endroit se déplace pour atteindre l'auditeur. La mise en mouvement d'un objet initialement au repos est provoquée par des forces exercées sur l'objet (principe fondamental de la dynamique). C'est le cas pour l'air, il est mis en mouvement par une force. La force utilisée pour mettre l'air en mouvement dans une flûte est exercée par des muscles qui compriment les poumons. Cette compression va provoquer une augmentation de pression de l'air présent dans les poumons, cette surpression étant transmise dans toute la colonne d'air jusque dans la bouche puis à l'entrée du corps de l'instrument par l'intermédiaire du bec.

Pour travailler confortablement, on choisit d'étudier le mouvement d'une petite quantité d'air présent initialement dans le corps de la flûte à la sortie du bec. Cette quantité d'air occupe un petit volume qui va être soumis à une variation de pression du côté du bec alors que la pression du côté de l'extrémité de la flûte n'a pas varié. Comme la pression est une force (par unité de surface), l'élément de volume de gaz va pouvoir se mettre en mouvement. On comprend donc comment mettre en mouvement l'air dans la flûte. Le principe fondamental de la dynamique nous permet alors de décrire le mouvement de l'air dans le corps de l'instrument. Cependant, l'air n'est pas un solide, c'est un gaz qui, en plus de sa mise en mouvement, se déforme sous l'effet d'une force. Lorsqu'il est soumis à la force de pression excitatrice, l'élément de volume d'air voit son volume varier. On doit tenir compte de cette déformation. Pour cela il faut modéliser le comportement de l'air. On choisit de le considérer comme un gaz parfait, c'est un modèle théorique simple de gaz, adapté à l'air dans les conditions d'utilisation d'une flûte et dont on sait étudier le comportement. On sait notamment prévoir la façon dont le volume d'une petite quantité d'un tel gaz varie sous l'effet d'une variation de pression. Pour décrire ces déformations, on définit des grandeurs, nommées coefficients de compressibilité qui indiquent comment le volume du gaz change lorsqu'il est soumis à des forces de pressions. En fonction des conditions auxquelles est soumis le gaz lorsqu'il est soumis à une surpression, sa variation de volume évolue, c'est pourquoi il existe plusieurs coefficients de compressibilité (isotherme, isentropique...). Dans le problème qui nous intéresse, on considère que le gaz est dans les conditions d'une évolution isentropique, ce qui signifie approximativement qu'il ne reçoit pas d'énergie thermique mais uniquement de l'énergie mécanique par la force de pression. La façon dont l'air se déforme sous l'effet de la surpression qu'on lui impose est donc prise en compte dans l'équation du mouvement en y introduisant le coefficient de compressibilité isentropique.

² voir bibliographie [Champeau, Delsart] chap I, II et III.

Après avoir mis en équation le mouvement de la petite quantité d'air initialement située au voisinage du bec sous l'effet de la force de pression et en ayant tenu compte des déformations de cette quantité d'air liées à sa compressibilité, on obtient une équation connue. L'équation de D'Alembert, identique à celle obtenue dans de nombreux phénomènes ondulatoires (ondes lumineuses, ondes électromagnétiques...). La solution de cette équation montre que le mouvement de la « tranche » d'air se transmet de proche en proche aux tranches d'air voisines avec une vitesse qui dépend des coefficients intervenant dans l'équation. Dans le cas présent, cette vitesse dépend du coefficient de compressibilité et de la masse volumique de l'air (ces deux grandeurs dépendant elles même, entre autre, de la température !). On peut à ce stade de notre étude exprimer la vitesse de propagation du son dans l'air.

Cependant l'étude n'est pas finie, en effet, la propagation de proche en proche des tranches d'air va finalement atteindre la tranche d'air située à l'extrémité de la flûte et le phénomène de propagation va être perturbé par le fait que les conditions de propagation de l'air sont modifiées. Jusqu'à présent les tranches d'air mises en mouvement étaient confinées à l'intérieur de la flûte. Arrivant à l'extrémité, les tranches d'air n'y sont plus confinées, il y a un changement, nommé discontinuité. L'effet de cette discontinuité est qu'une partie du phénomène de propagation va se réfléchir, produisant une deuxième transmission de proche en proche dans le corps de la flûte, mais orienté de l'extrémité vers le bec (ce phénomène est bien connu en optique, par exemple lorsque de la lumière est envoyée sur du verre, une partie de la lumière est transmise, elle traverse le verre et une partie est réfléchi, elle repart dans le milieu dans lequel elle se propageait initialement dans l'autre sens). Il se forme donc dans le corps de la flûte deux ondes progressives, progressant en sens opposé. Ces deux ondes voient leurs effets s'additionner et l'analyse des conditions imposées aux extrémités de la flûte permet de déterminer les mouvements résultant de l'addition de ces deux ondes progressives. On observe que certaines ondes dites stationnaires apparaissent alors dans la flûte. Ces ondes sont caractérisées par le fait qu'en certains points du corps de la flûte l'air ne bouge jamais (ces points sont les nœuds de déplacement, qui coïncident avec des ventres de pression c'est-à-dire des points où la pression est maximale) alors qu'en d'autres points l'air oscille autour de sa position initiale de gauche à droite puis de droite à gauche, l'amplitude de son mouvement évoluant au cours du temps. Ce phénomène est dit stationnaire car la répartition des nœuds de déplacement (et également des ventres de déplacement) est fixe et n'évolue pas au cours du temps. On peut donc décrire l'état de la colonne d'air dans la flûte en indiquant la position des différents nœuds et ventres de déplacement (ou de pression).

On caractérise l'onde stationnaire créée par la distance séparant deux nœuds de déplacements que l'on nomme demi longueur d'onde ($\lambda/2$) de l'onde formée. La longueur d'onde est reliée dans les solutions de l'équation de D'Alembert à la façon dont l'onde évolue temporellement, en particulier à la façon dont l'amplitude des ventres de déplacement et de pression évolue au cours du temps. On observe que cette amplitude évolue périodiquement, c'est-à-dire de façon régulière, l'intervalle de temps séparant deux instant où l'amplitude d'un ventre de déplacement (ou de pression) est maximale étant constant. Le phénomène ondulatoire installé dans la flûte est donc périodique, c'est-à-dire que c'est un phénomène se reproduisant identique à lui-même à intervalle de temps régulier. La période dépend de la longueur d'onde de l'onde stationnaire dans la flûte et des propriétés de l'air, en particulier de la vitesse du son. En modifiant la longueur d'onde de l'onde stationnaire formée dans la flûte il est donc possible de modifier la période (et la fréquence car la fréquence d'un phénomène est simplement l'inverse de sa période) du phénomène ondulatoire.

L'air vibrant dans la flûte de façon périodique transmet ses vibrations à l'air extérieur (nous n'avons pas étudié cette transmission dans ce mémoire) et ces vibrations périodiques

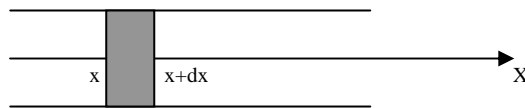
sont ensuite transmises de proche en proche dans le milieu extérieur, quasiment de la même façon que l'onde progressive étudiée initialement dans le corps de la flûte, la seule différence étant que la propagation ne se fait plus uniquement dans la direction du corps de la flûte (propagation unidirectionnelle) mais dans toutes les directions (onde sphérique). Cette vibration périodique arrive alors jusqu'au tympan de l'auditeur. L'information est transmise au cerveau et ce dernier les interprète comme des notes de musiques (voir à ce sujet le paragraphe II de cette partie).

I-1. Equation des tuyaux sonores.

Un son est représenté en physique par une onde acoustique, c'est-à-dire par l'établissement d'oscillations dans un milieu continu (liquide, gaz, solide). Pour décrire ces oscillations, on considère un petit élément de volume dans le milieu et on étudie ses déplacements autour de la position qu'il occupe lorsque le milieu est au repos. Dans le cadre de ce mémoire, le milieu de propagation de l'onde acoustique est l'air.

I-1.1. Notations utilisées.

On souhaite étudier les déplacements d'un petit élément de volume du gaz et étudier comment ces déplacements se transmettent aux éléments de volumes voisins. On considère le corps de la flûte comme un cylindre (perce cylindrique), on travaille sur une « tranche » de gaz comprise, lorsque l'air est au repos, entre les plans d'abscisse x et $(x+dx)$. La notation dx représentant en physique un élément de longueur infinitésimal, c'est-à-dire aussi petit qu'on le veut pour les calculs mais non nul.



- Déplacement ξ .

On note $\xi(x,t)$ le déplacement par rapport à sa position de repos du plan d'abscisse x , à l'instant t .

Ainsi à l'instant t , la tranche de gaz occupe le volume compris entre les plans $(x+ \xi(x,t))$ et $(x+dx+ \xi(x+dx,t))$.

- Dilatation δ

A priori, $\xi(x,t)$ est différent de $\xi(x+dx,t)$ donc le volume de la tranche de gaz peut varier au cours de la propagation, il faudra donc tenir compte des dilatations possibles du gaz. On note $\delta=d\xi/dx$ la dilatation de la tranche de gaz. Il s'agit en fait de la variation relative du volume de la tranche : $[(\text{volume à l'instant } t - \text{volume initial})/\text{volume initial}]$ lorsque l'épaisseur dx de la tranche est très petite : $\delta=dV/V$

- Compressibilité isotherme χ_T , relation entre dilatation et surpression.

En thermodynamique on caractérise les comportements d'un système à l'aide d'un petit nombre de variables (les variables d'états) température T , volume V , pression P . En fonction du fluide étudié, il est possible de relier dans certaines conditions, certains de ces paramètres

entre eux. On obtient alors une équation qualifiée d'équation d'état permettant d'exprimer par exemple le volume comme une fonction des deux autres variables T et P. On note $V=V(T,P)$. Mathématiquement, il est alors possible d'exprimer la façon dont varie V lorsque T et P varient, à l'aide de la différenciation de la fonction :

$$\Delta V = \partial V / \partial P \cdot \Delta P + \partial V / \partial T \cdot \Delta T + \text{reste infinitésimal (négligé par la suite)}.$$

Si la température T reste constante, alors la variation de volume ne dépend plus que des variations de pression : $\Delta V = \partial V / \partial P \cdot \Delta P$ (pour une transformation isotherme)

On peut réécrire cette formule : $\Delta V = -V_0 \chi_T \cdot \Delta P$ où V_0 représente le volume du fluide « au repos ». Alors χ_T représente la variation relative de volume par rapport à la variation de pression qui l'a provoquée pour un système évoluant à température constante.

$\chi_T = -1/V \partial V / \partial P$ à température constante (on utilise un signe – car lorsque $\Delta P > 0$, c'est-à-dire lorsqu'on augmente la pression, le volume diminue pour la plupart des gaz $\Delta V < 0$ et il est plus agréable de manipuler des nombres positifs). χ_T s'appelle la compressibilité isotherme du gaz, c'est une caractéristique du gaz.

On peut donc relier la dilatation δ du gaz à la variation de pression qui lui donne naissance ΔP à l'aide de la compressibilité isotherme par la relation :

$$\delta = \Delta V / V = -\chi_T \Delta P.$$

- Compressibilité isentropique χ_s , relation entre dilatation et surpression.

Le raisonnement précédent définissant la compressibilité isotherme et la relation entre dilatation et surpression peut se refaire en ne considérant plus une évolution isotherme mais une évolution adiabatique réversible. C'est-à-dire que la température n'est plus considérée comme constante, en revanche, on considère que le gaz ne reçoit pas de chaleur au cours de l'évolution, ce qui est acceptable si les mouvements de la tranche de gaz sont assez rapides pour que le gaz n'ait pas le temps de recevoir beaucoup d'énergie thermique (chaleur) au cours son évolution. On considère également qu'à tout instant le gaz est en équilibre thermodynamique local, c'est-à-dire qu'il est possible de définir son état à chaque instant et en chaque point en fonction des variables d'états. Dans ce cas, la grandeur physique qui reste constante n'est plus la température T mais l'entropie du gaz notée S.

Alors pour une telle transformation, on peut écrire : $\delta = \Delta V / V = -\chi_s \Delta P$.

Avec $\chi_s = -1/V \partial V / \partial P$ (à entropie constante).

χ_s s'appelle la compressibilité isentropique.

- Vitesse et accélération.

On peut également définir la vitesse de déplacement de la tranche de gaz en prenant $v = d\xi / dt$ et son accélération en prenant $a = d^2\xi / dt^2$.

I-1.2. Modélisation de l'air.³

Pour décrire l'évolution de la tranche de gaz, il faut modéliser le gaz et exprimer sa compressibilité isentropique. On considère l'air comme un gaz parfait. C'est le modèle le plus simple pour un gaz, dans lequel on considère que les molécules d'air sont identiques, de volume très faible, sans interaction entre elles. Ce modèle est pleinement justifié pour l'air dans les conditions d'utilisation d'une flûte.

Pour un gaz parfait évoluant de façon adiabatique et réversible (c'est la modélisation la plus adaptée à l'expérience étudiée), on peut démontrer que la relation suivante est vérifiée :

³ voir bibliographie [Grécias, Migeon] p559

$$P.V^\gamma = \text{constante} = P_0.V_0^\gamma.$$

Où γ est un coefficient caractérisant le gaz étudié.

Alors

$$\chi_s = -1/V \cdot \partial V / \partial P = 1/(\gamma P) \approx 1/(\gamma P_0)$$

Pour de l'air $\gamma=1,4$, à la pression $P=10^5 \text{Pa}$ on trouve $\chi_s=0,7.10^{-5} \text{Pa}^{-1}$. C'est-à-dire qu'une surpression de 1 Pa provoque une variation relative de volume de $0,7.10^{-3} \%$ pour le gaz si la transformation est adiabatique et réversible.

I-1.3. Equation du mouvement de la tranche de gaz.

Pour étudier le mouvement de la tranche de gaz, on doit appliquer le principe fondamental de la dynamique (ou 2ième loi de Newton) qui relie l'accélération d'un système matériel (en réalité de son centre de masse) α et sa masse m à la somme des forces qui s'exercent sur l'objet $\Sigma \Phi$ (dans un référentiel galiléen):

$$m\alpha = \Sigma \Phi$$

Ici l'objet dont on étudie le mouvement est la tranche de gaz de masse $m = \mu \cdot S \cdot dx$ où μ est la masse volumique de la tranche, S la section cylindrique de la flûte et dx l'épaisseur de la tranche (ainsi $S \cdot dx$ est le volume de la tranche de gaz).

Les forces qui s'exercent sur la tranche sont les forces de pression qui s'exercent respectivement sur le plan d'abscisse x : $S \cdot p(x,t)$ et sur le plan d'abscisse $(x+dx)$: $-S \cdot p(x+dx,t)$

Remarque : Dans les forces de pression, on ne prend en compte que les surpressions, c'est-à-dire l'augmentation algébrique de la pression par rapport à la pression atmosphérique (ce qui est justifié car on effectue une différence).

Alors la relation fondamentale de la dynamique s'écrit :

$$\begin{aligned} S \cdot dx \cdot \mu \cdot \partial^2 \xi / \partial t^2 &= -S \cdot p(x+dx,t) + S \cdot p(x,t) \\ \Leftrightarrow dx \cdot \mu \cdot \partial^2 \xi / \partial t^2 &= -[p(x+dx,t) - p(x,t)] \\ \Leftrightarrow dx \cdot \mu \cdot \partial^2 \xi / \partial t^2 &= -\partial p / \partial x \cdot dx \end{aligned}$$

Or $p = -\delta / \chi_s$ (voir précédemment, on a juste changé la notation ΔP par p) et $\delta = d\xi / dx$ donc $p = -1/\chi_s \cdot \partial \xi / \partial x$ et $\partial p / \partial x = -1/\chi_s \cdot \partial^2 \xi / \partial x^2$

La relation fondamentale de la dynamique implique donc

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow dx \cdot \mu \cdot \partial^2 \xi / \partial t^2 &= -\partial p / \partial x \cdot dx \\ \Leftrightarrow dx \cdot \mu \cdot \partial^2 \xi / \partial t^2 &= 1/\chi_s \cdot \partial^2 \xi / \partial x^2 \cdot dx \\ \Leftrightarrow \chi_s \cdot \mu \cdot \partial^2 \xi / \partial t^2 &= \partial^2 \xi / \partial x^2 \end{aligned}$$

Cette équation est l'équation de propagation des ondes planes (c'est l'équation de D'Alembert pour une propagation dans une seule direction).

I-2. Solution de l'équation.

I-2.1. Solution générale.

L'équation obtenue précédemment est une équation connue en physique qui se retrouve dans un grand nombre de situations (ondes électromagnétiques, propagation le long d'une corde....). De façon générale, cette équation a pour forme :

$$1/c^2 \cdot \partial^2 \xi / \partial t^2 = \partial^2 \xi / \partial x^2$$

ou c^2 représente le carré de la célérité (vitesse) de l'onde dans le milieu considéré.

Ainsi dans la flûte il y a une propagation d'ondes planes à la vitesse $c = 1/\sqrt{\mu\chi_s}$. c représente dans le cas présent la vitesse du son dans le gaz considéré.

En prenant pour l'air $\chi_s = 0,7 \cdot 10^{-5} \text{Pa}^{-1}$ et $\mu = 1,3 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ on obtient $c = 332 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Mathématiquement, on montre que la solution générale de cette équation est de la forme :

$$\xi(x,t) = f(t-x/c) + g(t+x/c)$$

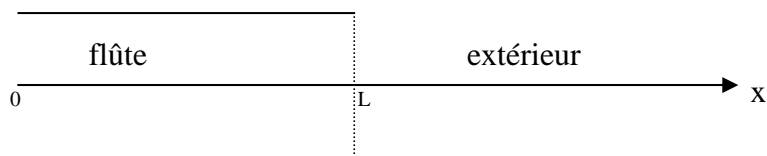
f et g étant des fonctions à priori quelconques que l'on détermine en fonction des conditions expérimentales. Ici, ces fonctions seront déterminées par la forme de la flûte, par les trous ouverts ou bouchés et par le flux d'air envoyé dans la flûte.

Le terme $f(t-x/c)$ représente une onde se propageant dans le sens des x croissants. En effet, si à l'instant $t=0$ l'onde a la valeur f_0 au point x_0 , à l'instant t , on retrouve la valeur f_0 au point x vérifiant $f(t-x/c) = f_0 = f(-x_0/c) \Leftrightarrow t-x/c = -x_0/c \Leftrightarrow x = x_0 + c \cdot t > x_0$ donc en un point x situé après le point x_0 . Inversement, le terme $g(t+x/c)$ représente une onde se propageant dans le sens des x décroissants.

En fonction de la flûte, des trous ouverts et bouchés et de la façon « d'amorcer » l'émission par le souffle, on peut envisager toute sorte d'onde dans la flûte. Pourtant, il faut tenir compte de certaines caractéristiques de la flûte.

I-2.2. Système d'ondes stationnaires sinusoïdales.

Comme la flûte n'est pas de longueur infinie, il se produit une discontinuité à son extrémité qui induit un phénomène de réflexion partielle de l'onde incidente.



Pour aborder cette étude, considérons tout d'abord un tuyau fermé en son extrémité en $x=L$.

Soit $\xi_i(x,t) = f(t-x/c)$ le déplacement de l'onde incidente, $\xi_r(x,t) = g(t+x/c)$ celui de l'onde réfléchie. A l'abscisse $x=L$ correspondant à l'extrémité fermée du tuyau, le déplacement doit être nul. On doit donc avoir $\xi_i + \xi_r = 0 \forall t$.

Soit $f(t-L/c) + g(t+L/c) = 0 \forall t \Leftrightarrow g(t) = -f(t-2L/c)$ (en effectuant un changement de variable $t' = t+L/c$)

$$\text{soit } \xi_r(x,t) = -f(t-(2L-x)/c)$$

Le déplacement de l'onde résultante est donc $\xi(x,t) = \xi_i(x,t) + \xi_r(x,t) = f(t-x/c) - f(t+(x-2L)/c)$

Pour une raison qui sera expliqué au paragraphe II de cette partie, il est particulièrement important d'étudier les ondes sinusoïdales. Supposons donc que le musicien parvienne à exciter une onde incidente sinusoïdale d'expression $\xi_i(x,t) = A \cos \omega(t-x/c)$ (A est l'amplitude de l'onde, ω sa pulsation).

Alors l'onde résultante a pour expression :

$$\xi(x,t) = A \cos \omega(t-x/c) - A \cos \omega(t+(x-2L)/c) = -2A \sin \omega((L-x)/c) \cdot \sin \omega(t-L/c)$$

En effet $\cos p - \cos q = -2 \sin((p+q)/2) \cdot \sin((p-q)/2)$.

On remarque que tous les points du fluide oscillent soit en phase soit en opposition de phase, il n'y a donc plus réellement de propagation. On dit qu'il s'agit d'une onde stationnaire.

I-2.3. Nœuds et ventres de déplacement et de pression.

Pour préciser la notion d'onde stationnaire, on peut remarquer qu'en certains points du tube, le déplacement est toujours nul, quel que soit l'instant t considéré. Ce sont les points vérifiant : $\sin \omega(L-x)/c = 0 \Leftrightarrow L-x = n\pi c/\omega$ avec $n=1,2,\dots \Leftrightarrow x=L-n\lambda/2$ en posant $\lambda=2\pi c/\omega$. λ s'appelle la longueur d'onde de l'onde stationnaire. Elle représente l'extension spatiale de l'onde considérée.

Les points vérifiant cette condition sont appelés les nœuds de déplacement.

On remarque également qu'en d'autres points, l'amplitude du déplacement est maximale. Ce sont les points vérifiant $|\sin \omega(L-x)/c| = 1 \Leftrightarrow x=L-\lambda/4-n\lambda/2$ avec $n=1,2,\dots$

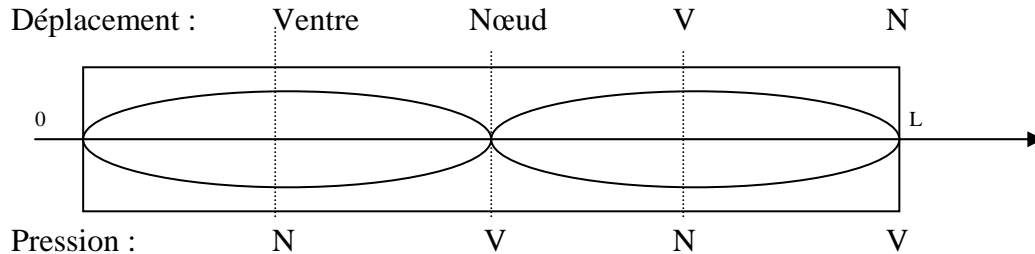
Ces points correspondent aux ventres de déplacement.

Connaissant l'expression du déplacement $\xi(x,t)$, on peut en déduire l'expression de la surpression par la formule :

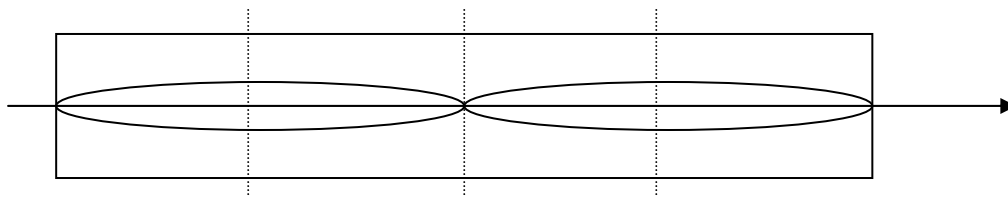
$$p = -1/\chi_s \cdot \partial \xi / \partial x = 2A\omega / (\chi_s c) \cdot \cos \omega((L-x)/c) \cdot \sin \omega(t-L/c)$$

Ainsi les nœuds de pression correspondent aux ventres de déplacement et les ventres de pression correspondent aux nœuds de déplacement.

Exemple : Position des nœuds et ventres dans le cas d'une onde de longueur d'onde $\lambda=L$



Même onde à un instant différent :



On observe que l'amplitude de l'onde a varié localement mais les nœuds et les ventres n'ont pas bougé, ce qui justifie le terme d'onde stationnaire.

I-2.4. Tuyau ouvert à une extrémité.

Si le tuyau est ouvert à une extrémité, cela revient à imposer une surpression nulle à cette extrémité du tuyau (la pression à l'extérieur étant égale à la pression atmosphérique et en

considérant que la pression varie de façon continue dans le gaz). Ainsi cela revient à imposer la position d'un nœud de pression en $x=L$ et donc un ventre de déplacement en cette position. Cela permet d'écrire l'expression de l'onde stationnaire :

$$\xi(x,t) = 2A \cos \omega((L-x)/c) \cdot \sin \omega(t-L/c)$$

Comme le tuyau est fermé à l'entrée en $x=0$, on doit avoir un nœud de déplacement en $x=0 \forall t$ donc l'onde doit vérifier $A \cdot \cos(\omega L/c) = 0$ soit $\omega = (n+1/2) \pi c/L$ avec $n=1,2,\dots$
cette condition est équivalente à : $L = (n+1/2)\lambda/2$

I-2.5. Tuyau ouvert aux deux extrémités.

On considère généralement les flûtes comme des tuyaux ouverts aux deux extrémités⁴. Dans ce cas, l'expression obtenue précédemment pour la condition en $x=L$ reste vérifiée :

$$\xi(x,t) = 2A \cos \omega((L-x)/c) \cdot \sin \omega(t-L/c)$$

Mais comme le tuyau est ouvert à l'entrée en $x=0$, on doit avoir un nœud de pression en $x=0$ donc un ventre de déplacement. $\forall t$ l'onde doit donc vérifier $|\cos(\omega L/c)| = 1$ soit $\omega = n \pi c/L$ avec $n=1,2,\dots$

$$\text{Soit } \lambda = 2L/n \text{ (en effet } \omega = 2\pi c/\lambda)$$

Ainsi toutes les longueurs d'onde ne sont pas autorisées dans le tuyau, seules les ondes stationnaires vérifiant la condition précédente peuvent apparaître dans la flûte.

La longueur d'onde la plus élevée est $\lambda_0 = 2L$, la pulsation correspondante étant $\omega_0 = \pi c/L$ et la fréquence correspondante

$$f_0 = \omega_0 / 2\pi = c / 2L$$

Cette loi est la loi de Bernoulli⁵ pour les tuyaux ouverts aux deux bouts. Cette loi permet de calculer la hauteur du son donné par un tuyau ouvert aux deux extrémités.

Remarque : Dans un tuyau ouvert, le nœud de pression n'est en fait pas exactement situé dans le plan terminal du tuyau mais un peu au-delà, à une distance proportionnelle au diamètre du tuyau. La longueur effective⁶ du tuyau est donc légèrement supérieure à sa longueur géométrique.

La formule ainsi que la remarque précédente permettront de déterminer la longueur à donner à une flûte pour l'accorder. Nous y reviendrons dans le paragraphe suivant.

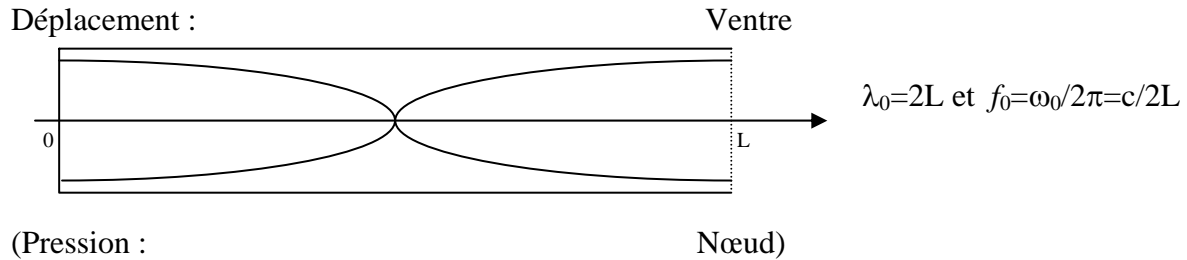
Notons qu'en général plusieurs ondes stationnaires se trouvent émises simultanément dans la flûte mais que toutes ces ondes doivent vérifier les contraintes précédemment établies (position de certains ventres et nœuds de pression imposée).

⁴ voir bibliographie [Champeau, Delsart] p49chapIII

⁵ voir bibliographie [E.Leipp] p217

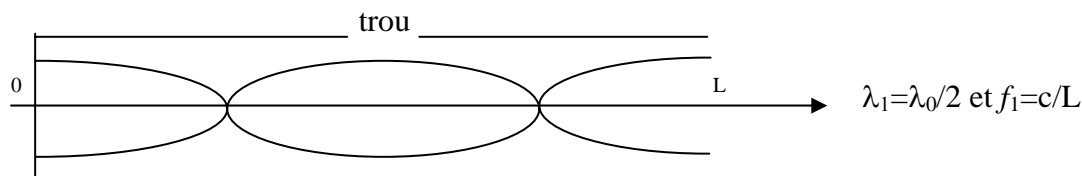
⁶ voir bibliographie[Bouasse] p103

Exemple : Position des nœuds et ventres dans le cas d'une flûte pour la longueur d'onde λ_0 . On représente la longueur effective de la flûte L (légèrement supérieure à sa longueur réelle).



Si on désire modifier la longueur d'onde de l'onde stationnaire créée, on peut imposer en certains points de l'instrument d'autres nœuds de pression, c'est ce que l'on fait en laissant ouverts certains trous.

Par exemple pour émettre une onde de longueur d'onde $\lambda_1=\lambda_0/2$ (correspondant à $n=2$), on peut imposer un second ventre de pression comme le schéma suivant le montre.



En disposant plusieurs trous sur le corps de la flûte, on parvient ainsi à imposer des systèmes d'ondes stationnaires de longueur d'onde déterminée dans la flûte, ce qui permettra d'accorder l'instrument.

En réalité, l'expérience nous indique qu'il est possible de modifier continûment la hauteur d'une note en ouvrant progressivement un trou, cette remarque prouve que le fait de considérer que la position d'un trou impose la position d'un ventre de pression n'est qu'une façon approximative d'aborder les principes d'émissions sonores avec une flûte. Certains auteurs⁷ considèrent que l'ouverture du trou revient à modifier la longueur effective de la flûte.

I-3. Application et critiques.

I-3.1. Emission des sons.

On considère donc que par le bec, on met en vibration la colonne d'air située à l'intérieur de la flûte. Il se crée un champ acoustique interne. Il faut déterminer comment ce champ interne est transmis à l'extérieur. Tout d'abord le champ acoustique interne donne lieu à un rayonnement par l'extrémité ouverte de la flûte, créant un champ acoustique externe qualifié de rayonnement frontal⁸. Ensuite il y a un rayonnement par la fenêtre créant également un champ externe appartenant au rayonnement latéral. Cependant il y a également transmission du champ interne par mise en vibration du corps de l'instrument (couplage vibro-acoustique

⁷ voir bibliographie[Bouasse] p96

⁸ Voir bibliographie [F. Gautier]

intérieur) puis mise en vibration de l'air extérieur par le corps de la flûte (couplage vibro-acoustique extérieur) créant un rayonnement acoustique externe complétant le rayonnement latéral.

Les rayonnements frontal et latéral s'additionnent ensuite (on dit qu'il y a un couplage entre ces rayonnements) pour créer de façon complexe l'onde acoustique externe résultante.

Cette transmission du système d'onde stationnaire de l'intérieur de la flûte vers le milieu extérieur est complexe, nous ne l'étudierons pas dans ce mémoire.

I-3.2. Réglages d'une flûte.

Pour jouer juste, une flûte doit pouvoir émettre de façon reproductible des systèmes d'ondes stationnaires dont les fréquences correspondent à celles de la gamme utilisée.

On donne les fréquences définissant les notes dans la gamme à tempérament égal⁹.

Note	Fréquence du fondamental en Hz
Do3	261,6
Ré	293,7
Mi	329,6
Fa	349,2
Sol	392,0
La3	440
Si	493,9
Do4	523,2
Ré	587,3
Mi	659,3
Fa	698,5
Sol	784,0
La	880
Si	987,8

Nous avons vu dans un paragraphe précédent que l'onde stationnaire de plus grande longueur d'onde que peut émettre une flûte a pour longueur d'onde $\lambda_0=2L$ soit $f_0=c/2L$, ou L représente la longueur effective de la flûte, cette longueur étant légèrement supérieure à la longueur réelle de l'instrument. Il nous est donc possible de prévoir la note émise par une flûte lorsque tous les trous sont bouchés mais nous devons déterminer la correction à apporter à la longueur réelle de la flûte pour connaître sa longueur effective.

On choisit donc une flûte soprano Yamaha en plastique dont on sait qu'elle doit émettre un do donc de fréquence multiple de $f=261,6\text{Hz}$ lorsque tous les trous sont bouchés. On considère que la vitesse du son dans l'air est¹⁰ $332\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Alors la longueur effective théorique est $L_{\text{eff}}=c/2f_0$. Si on prend $f_0=523,2\text{ Hz}$ (do4) on obtient une longueur effective de 31,7cm ce qui est proche de la longueur réelle de la flûte (mais cela revient à dire que la note la plus basse jouée par la flûte soprano est un do4 alors qu'il s'agit en réalité d'un do5, ceci s'explique peut-être par le fait que le fondamental n'est pas excité mais que c'est le premier harmonique qui domine).

⁹ Voir annexe 1 notion succinctes sur les gammes.

¹⁰ valeur calculée au paragraphe I-2.1. de cette partie.

La longueur mesurée (du bloc à l'extrémité) est $L_{\text{mes}}=28\text{cm}$. On va donc supposer que connaissant la longueur réelle de la flûte, on peut en déduire sa longueur effective par la formule : $L_{\text{eff}} = 31,7/28 \cdot L_{\text{mes}} = 1,13 \cdot L_{\text{mes}}$ (Cette formule correctrice n'est qu'une approximation qui suppose qu'il y a une relation de proportionnalité entre L_{eff} et L_{mes}).

On peut maintenant tester ces prédictions sur d'autres flûtes :

	L_{mes}	L_{eff}	$f_0=c/2 \cdot L_{\text{eff}}$	Note calculée	note jouée
Ténor Yamaha	58cm	65cm	256Hz	do3	do4
Alto Yamaha	41cm	46cm	358Hz	fa3	fa4
Sopranino Aulos	21cm	24cm	692Hz	fa4	fa5

On remarque évidemment de petits écarts entre les fréquences calculées et les fréquences des notes correspondantes mais pour indiquer la note attendue, on a systématiquement choisi la note dont la fréquence est la plus proche de celle calculée. On observe que la théorie permet donc bien de prédire la note jouée en mesurant la longueur de la flûte. Les différences proviennent de l'erreur sur la longueur effective de la flûte (qui dépend de la forme de la perce et de perturbations dues à la dynamique des fluides) mais également d'une erreur sur la vitesse du son (qui dépend notamment de la température, de la pression et de l'hygrométrie). Le tempérament et le choix de la fréquence de base intervient également. Il est vraisemblable que d'autres paramètres devraient être pris en compte pour améliorer le modèle mais cette expérience justifie a posteriori le modèle développé dans ce chapitre.

I-3.3. Critique du modèle.

Le modèle proposé donne des résultats assez satisfaisants, il permet en particulier de prévoir approximativement la hauteur des sons produits en fonction des trous ouverts ou bouchés sur la flûte. Cependant il présente de nombreuses approximations dont certaines peuvent être importantes.

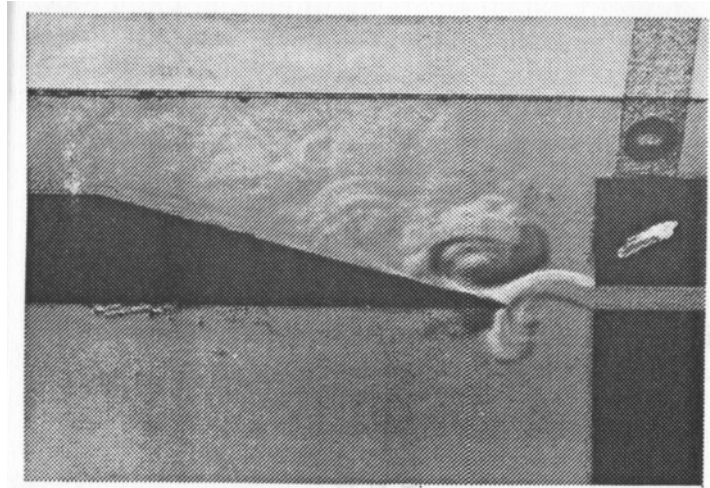
La principale approximation a été de ne pas tenir compte de la façon dont les ondes sont engendrées dans la flûte par l'intermédiaire du bec. Ce bec est indispensable pour fournir l'énergie initiale et mettre l'air présent dans le corps de la flûte en mouvement. En réalité, par l'intermédiaire de ce bec on envoie de l'air avec une certaine vitesse au point $x=0$ du tuyau sonore. Du fait de cette vitesse, il apparaît deux problèmes venant perturber le système d'ondes stationnaires dans la flûte.

Tout d'abord, dans tout fluide en mouvement il y a modification du champ de pression à cause de la vitesse : c'est l'effet Venturi. A cause de cet effet, l'hypothèse consistant à placer un ventre de pression en $x=0$ et un nœud en $x=L$ n'est pas exactement vérifiée, on peut donc penser que la pression n'a pas exactement le comportement décrit. C'est cette hypothèse qui permet certainement d'expliquer que la longueur effective du tuyau est légèrement supérieure à sa longueur réelle.

Par ailleurs, toujours à cause de la vitesse du fluide au niveau du biseau, l'air ne s'écoule pas de façon régulière (écoulement laminaire) mais peut se trouver perturbé (écoulement turbulent). A cause des tourbillons engendrés dans l'écoulement turbulent, le système d'ondes stationnaires peut être modifié.

A titre d'illustration, on donne une photographie¹¹ d'un jet d'air au niveau du biseau d'un tuyau d'orgue sur lequel il apparaît bien que le jet est complexe, ce qui montre que le problème est plus compliqué que notre modèle le laisse prévoir.

¹¹image tirée de [Hirschberg et al]



Écoulement dans un tuyau d'orgue

Cependant, il est acquis que ce sont les ondes stationnaires qui caractérisent le son émis par l'instrument, en effet, contrairement aux autres ondes qui peuvent se propager dans la flûte, elles présentent un caractère suffisamment régulier pour être identifiées comme des notes, les autres ondes n'étant qualifiées que de bruit.

Pour une description plus précise des mécanismes d'émission par la flûte il faudrait également tenir compte de la forme de la perce qui n'est pas cylindrique pour toutes les flûtes, de la forme des trous, du bec, de la nature du matériau, de la façon de souffler dans la flûte...

Compte tenu de la complexité du problème soulevé, il est préférable de tenter de poursuivre l'étude de l'instrument expérimentalement. Dans la seconde partie de ce mémoire, on étudiera donc quelques caractéristiques des ondes de manière expérimentale. Auparavant il faut justifier l'importance des ondes sinusoïdales utilisées précédemment, définir précisément la justesse d'un instrument, son timbre et avant tout indiquer ce qu'est une note de musique.

II-Analyse harmonique.

II-1. Bruits et sons.

Dans le chapitre précédent, on a étudié les processus d'émission des sons dans une flûte sans se préoccuper de musique. On doit maintenant définir un son musical. En musique, on considère qu'un son musical est caractérisé par une onde acoustique périodique alors que l'onde associée à un bruit n'est pas périodique. Rappelons qu'un signal est périodique s'il se reproduit identique à lui même à intervalle de temps régulier. Pour caractériser un signal périodique, on définit sa période T comme étant l'intervalle temporel séparant deux reproductions du signal à l'identique. On peut également définir la fréquence f du signal comme le nombre de reproduction du signal par seconde, naturellement $T=1/f$. On peut également relier la période à la pulsation ω du signal par la relation : $T=2\pi/\omega$. Une onde stationnaire correspond à un signal périodique, donc à un son musical. Il faut maintenant justifier l'utilisation des ondes sinusoïdales.

II-2. Spectre d'un son.

Tout signal périodique sera donc interprété comme un son par le cerveau humain, il est donc important de décrire précisément ce type de signal. Pour cela on utilise la théorie établie par Fourier concernant les signaux périodiques.

II-2.1. Décomposition en série de Fourier.¹²

Considérons un signal $s(t)$ périodique de période $T=2\pi/\omega$. A tout instant où le signal est continu (c'est le cas des ondes acoustiques étudiées), il peut se développer comme une série de fonctions sinusoïdales de la façon suivante :

$$s(t)=A_0/2 + \sum[A_k \cos(k\omega t)+B_k \sin(k\omega t)]$$

$$\text{avec } A_k=2/T \int s(t) \cos(k\omega t) dt \text{ et } B_k=2/T \int s(t) \sin(k\omega t) dt$$

Remarque : Pour une fonction paire $B_k=0$, pour une fonction impaire $A_k=0$.

Ainsi, tout signal périodique peut s'écrire comme l'addition de signaux sinusoïdaux, d'où l'importance qu'il y a à étudier les ondes sinusoïdales, en effet, quel que soit le signal périodique étudié, il sera toujours possible pour l'analyser d'étudier l'évolution des différentes sinusoïdes qui le composent.

II-2.2. Spectre du signal.

On peut réécrire :

$$s(t)= S_0+\sum S_k$$

S_0 est la composante continue du signal, $s_k(t)=A_k \cos(k\omega t) + B_k \sin(k\omega t)$

$$s_1(t)= A_1 \cos(\omega t)+B_1 \sin(\omega t)$$

$$s_k(t)=A_k \cos(k\omega t)+B_k \sin(k\omega t)=C_k \cos(k\omega t+\phi_k) \text{ avec } C_k=\sqrt{A_k^2+B_k^2} \text{ et } \tan \phi_k=-B_k/A_k$$

Alors s_1 s'appelle l'harmonique de rang 1 ou fondamental du signal étudié, s_k est l'harmonique de rang k . L'ensemble des C_k représente le spectre de fréquence de $s(t)$, on peut le représenter sur un graphe donnant C_k en fonction de ω , λ , f ...

Pour reconstituer le signal $s(t)$ à partir de son spectre, il suffit d'effectuer la somme des différents harmoniques.

II-2.3. Exemples de décomposition en série de Fourier.

A titre d'exemple cherchons à déterminer le spectre de 2 fonctions périodiques simples :

- Fonction sinusoïdale $s(t)= A \sin (\omega t)$

C'est une fonction impaire, donc $A_k=0 \forall k$.

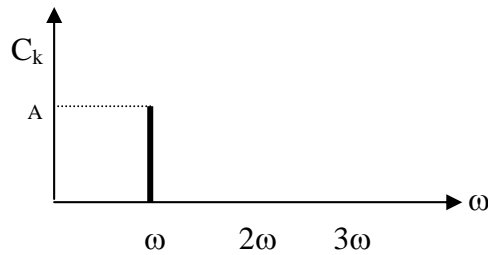
$$B_k=2A/T \int \sin(\omega t) \sin(k\omega t) dt = A/T \int \cos[(1-k)\omega t] dt - A/T \int \cos[(1+k)\omega t] dt$$

$$\text{car } 2 \sin a \sin b = \cos(a-b) - \cos(a+b)$$

$$\text{si } k=1 \quad B_1=A \quad \text{si } k \neq 1 \quad B_k=0$$

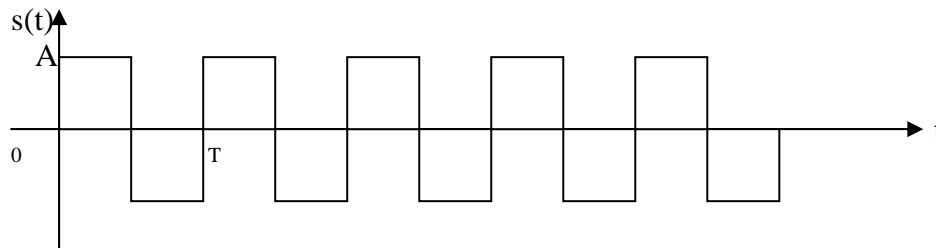
¹² voir bibliographie [Brébec] p139

Le spectre se compose donc uniquement du fondamental de pulsation ω .



- Fonction "créneau"

On désire déterminer le spectre de la fonction $s(t)$ représentée ci-dessous:



C'est une fonction impaire, donc $A_k=0 \forall k$.

$$B_k = 2/T \cdot \int s(t) \cdot \sin(k\omega t) dt = 2A/T \{ -\int \sin(k\omega t) dt + \int \sin(k\omega t) dt \}$$

$$\Leftrightarrow B_k = 2A/T \cdot \{ +[\cos(k\omega t)/k\omega] - [\cos(k\omega t)/k\omega] \}$$

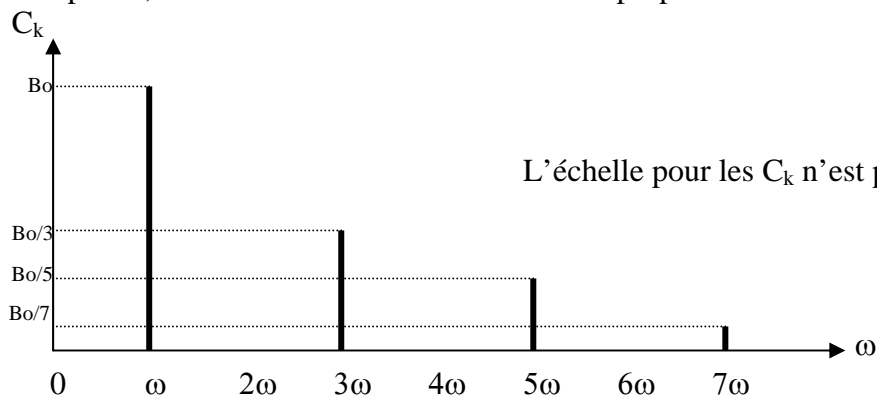
$$\Leftrightarrow B_k = -2A/k\pi \cdot [1 - \cos(k\pi)]$$

$$(\text{rappel: } \omega = 2\pi/T \text{ donc } \omega \cdot T/2 = \pi)$$

si k est pair alors $\cos(k\pi)=1$ donc $B_k=0$

si k est impair alors $\cos(k\pi)=-1$ donc $B_k=-4A/k\pi$.

La décomposition en séries de Fourier de ce signal créneau ne contient donc que les harmoniques impaires, le coefficient C_k étant inversement proportionnel à k .



Pour décrire un signal périodique, on pourra représenter son spectre. Ainsi, tout son musical émis par une flûte étant un signal périodique, il peut être défini par son spectre (fondamental et harmoniques). Ce son étant produit dans la flûte par une superposition d'ondes stationnaires sinusoïdales.

En pratique, des appareils nommés analyseurs de spectre permettent d'effectuer la décomposition en séries de Fourier d'un signal périodique. Dans la partie expérimentale de ce mémoire, nous tenterons de décrire les sons émis par différentes flûtes dans différentes conditions à l'aide de tels spectres obtenus par enregistrement de son puis analyse à l'aide d'un logiciel comportant un analyseur de spectre sommaire.

II-3. Hauteur d'une note.

Un son musical est donc caractérisé par le fait qu'il est périodique. On distingue alors les différents sons musicaux par leur période, c'est-à-dire par la période du fondamental de leur spectre, ou de façon identique par la fréquence ou la pulsation du fondamental. Deux sons ayant des fondamentaux de même fréquence seront donc interprétés par le cerveau comme des notes de même hauteur.

On peut donc définir chaque note par la fréquence du fondamental. Cette définition a évolué au cours du temps, actuellement les orchestres symphoniques prennent souvent pour définition du la₃ la fréquence 440Hz, voire 442Hz, mais on rencontre de nombreux instruments pour lesquels la définition de ce la est différente, par exemple 415Hz pour certains instruments baroques.

II-4. Timbre d'un instrument.

Choisir la hauteur d'une note, c'est choisir la période de l'onde associée, ce qui revient à choisir la fréquence du fondamental du spectre. Avec une flûte cette sélection se fait en imposant la position de différents nœuds et ventres de pression dans le corps de l'instrument. Lorsqu'une onde peut s'installer dans la flûte, il est possible que d'autres ondes respectant également les contraintes se superposent à la première, voir par exemple dans le paragraphe I-2.4., sur le schéma de l'onde λ_0 , on peut ajouter l'onde λ_1 qui respecte les contraintes imposées, en revanche sur l'onde λ_1 , on ne peut pas ajouter l'onde λ_0 qui ne respecte pas la position du ventre imposé par le trou ouvert. La plupart du temps c'est ce qui se produit et l'onde émise ne se limite pas à une onde stationnaire sinusoïdale. Le spectre émis compte un grand nombre d'harmoniques. En général le son produit est identifié comme une seule note dont la hauteur est déterminée par la fréquence du fondamental, mais dans certaines situations, les rapports des fréquences entre les différents harmoniques sont tels que l'on identifie plusieurs notes, on parle alors de sons multiphoniques.

Si lors de l'émission d'une note, on ne produisait que le fondamental, c'est-à-dire une sinusoïde parfaite, il ne serait pas possible de distinguer les instruments entre eux, c'est donc le spectre émis qui permet de reconnaître tel ou tel instrument. Le spectre émis caractérise donc le timbre de l'instrument.

Pour étudier un instrument de manière à identifier « scientifiquement » ses caractéristiques afin de pouvoir en tirer des sons de la meilleure qualité possible ou pour améliorer la facture, il est donc intéressant d'étudier le spectre de l'instrument. Actuellement, un grand nombre de recherches en acoustique musicale repose sur des analyses spectrales. C'est aussi l'objet de la partie expérimentale de ce mémoire. A l'aide d'observations sur les spectres émis dans différentes conditions, on va tenter d'énoncer quelques caractéristiques de l'émission sonore à l'aide d'une flûte. Il faut auparavant noter que l'étude des instruments par analyse spectrale est encore très loin d'offrir des résultats aussi convaincants que ceux obtenus par la pratique des interprètes lorsqu'il s'agit de tirer le plus grand profit d'un instrument existant ou par les facteurs lorsqu'il s'agit de créer ou de régler un instrument. Il

n'est pas possible de restreindre la musique à une analyse harmonique, le spectre émis étant en général plus complexe que ceux décrits précédemment. Cela apparaît d'ailleurs dans le fait qu'il n'existe encore pas de synthétiseur capable de reproduire fidèlement le timbre, les attaques, la sonorité des flûtes à bec ou d'autres instruments, alors qu'il est facile d'émettre des signaux quasi-sinusoidaux à l'aide de dispositifs électro-acoustique simples. Cela prouve qu'il n'est pas possible de restreindre les caractéristiques d'un instrument à son spectre obtenu par décomposition en séries de Fourier. Le paragraphe qui suit tente d'aborder les causes de ces restrictions.

II-5. Attaques, turbulence...

La décomposition en séries de Fourier n'est valable que pour un signal périodique, c'est-à-dire un signal qui se répète identique à lui-même à intervalle de temps régulier. Mais si le son étudié est émis à un instant donné pour s'arrêter un instant plus tard, ce signal n'est pas périodique mathématiquement car il cesse de se reproduire identiquement à lui-même. La décomposition en série de Fourier n'est donc possible théoriquement que sur des sons qui durent depuis un temps infini et ne cessent jamais. Comme le son commence à un moment donné, le spectre obtenu par décomposition en série n'est juste que de façon approximative. On considère d'ailleurs en acoustique qu'un instrument s'identifie en grande partie par ses attaques, c'est-à-dire précisément par ce qui fait que l'analyse spectrale n'est pas justifiée. Pour améliorer le modèle on peut utiliser l'opération de transformée de Fourier adaptée aux signaux non périodiques. Cette transformation repose sur le même principe d'analyse spectrale que la décomposition en série mais, alors que la décomposition en série donne un spectre discret, c'est-à-dire quelques harmoniques bien séparés, la transformée de Fourier donne un spectre continu, dans lequel on trouve des composantes harmoniques à toutes les fréquences et pas seulement aux fréquences multiples du fondamental.

En plus de l'attaque qui oblige à déterminer la transformée de Fourier du signal, les problèmes de turbulence évoqués au paragraphe I-3. et les ondes autres que stationnaires qui peuvent apparaître dans l'instrument ajoutent des émissions d'ondes acoustiques non périodiques qui viennent également perturber le spectre discret attendu. Ainsi le spectre d'un instrument s'obtient plutôt par transformation de Fourier du signal émis, ce spectre continu faisant cependant ressortir pour la plupart des instruments mélodiques un spectre discret comparable aux spectres obtenus par décomposition, plongé dans un bruit de fond continu plus ou moins important.

A l'aide des outils que nous avons définis dans toute cette partie théorique, il nous est désormais possible d'étudier expérimentalement quelques caractéristiques des flûtes à becs.

Objectif et protocole expérimental :

Dans cette partie, nous tenterons de mettre en évidence certaines caractéristiques de la flûte à bec par l'étude des ondes émises et des différents spectres correspondants. Tous les spectres que nous exploiterons ici ont été obtenus à l'aide du même protocole expérimental :

On enregistre tout d'abord un échantillon sonore à l'aide d'un lecteur enregistreur minidisque SONY MZ-R700 équipé d'un microphone stéréophonique unidirectionnel SONY ECM-717. L'avantage de ce système d'enregistrement est la qualité numérique obtenue. On peut en particulier souligner la bonne étendue spectrale de l'enregistrement.

L'échantillon sonore est ensuite entré dans l'ordinateur via la carte son et enregistré au format Wave à l'aide du logiciel Nero Wave editor (version 1.0 Ahead software)

Ce logiciel permet ensuite de travailler sur le fichier son (atténuation du bruit, amplification, réduction du volume de certaines parties, ajout d'effets) puis de visualiser la forme de l'onde obtenue. Dans ce mémoire je n'ai jamais modifié le fichier son (en dehors de coupes et de modification du niveau d'enregistrement).

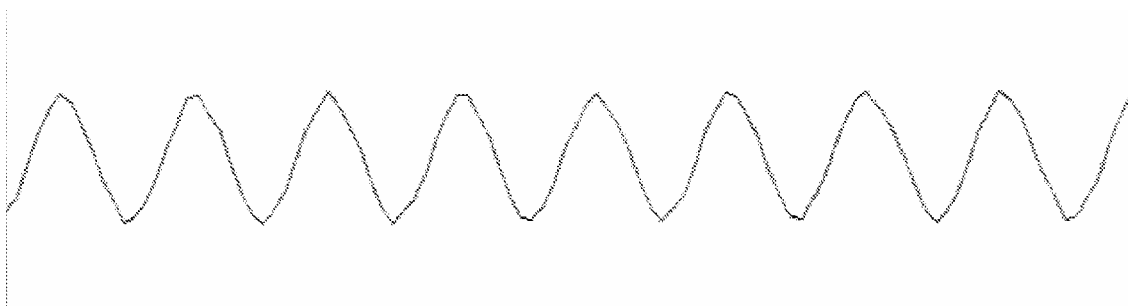
Nero Wave editor peut également effectuer la transformée de Fourier de l'échantillon sonore ce qui permet d'obtenir le spectre du son. Il est possible d'afficher le spectrogramme, c'est-à-dire l'évolution du spectre au cours du temps (voir par exemple paragraphe III de cette partie) ou d'afficher la forme de l'onde (voir par exemple paragraphe I-1. de cette partie) et le spectre à un instant donné (voir par exemple paragraphe II de cette partie).

Pour présenter les résultats, j'ai ensuite simplement imprimé des portions de copies d'écran de Nero Wave editor.

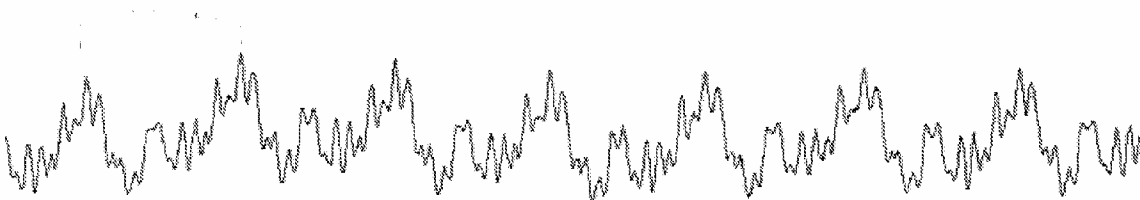
I- Forme des ondes.

I-1. Importance du fondamental.

Dans son article sur la flûte à bec, Michèle Castellengo ¹³ affirme qu'*une des caractéristiques du timbre de la flûte, qu'elle soit traversière, oblique ou à bec est le fait que l'énergie est concentrée à 80 ou 90% dans le fondamental.* Ceci se traduit par une forme d'onde quasi sinusoïdale puisque peu perturbée par les harmoniques d'ordre supérieur. Pour s'en convaincre, on peut observer au paragraphe II-2.3. de la partie précédente que lorsqu'il n'y a que le fondamental dans le spectre, la courbe obtenue est sinusoïdale, alors que lorsqu'on ajoute des harmoniques 3, 5, 7,... la courbe reste périodique mais s'éloigne de la sinusoïde. A titre d'exemple, j'ai enregistré un LA médium joué à la flûte à bec soprano et ce même LA joué au violoncelle, comparons les formes d'onde obtenues avec le logiciel :



La médium - flûte à bec



La - violoncelle

Remarque : Les courbes ayant été dilatées, les échelles ne sont pas significatives.

Il apparaît d'emblée que les formes d'ondes sont très différentes. L'onde associée à la flûte à bec est une sinusoïde presque parfaite tandis que celle du violoncelle est beaucoup plus perturbée. On peut en déduire que les harmoniques qui s'additionnent au fondamental perturbent peu l'onde émise par la flûte. L'intensité des harmoniques est donc faible par rapport à celle du fondamental.

¹³ voir bibliographie [Michèle Castellengo]

I-2. Effet de battements.

Il est un phénomène que l'on rencontre en musique d'ensemble, c'est le phénomène de battement. Il est très facile de le rencontrer lorsque l'on cherche, par exemple, à faire jouer ensemble deux flûtes soprano. Quand elles ne sont pas bien accordées et qu'elles tentent de jouer une même note, on entend très distinctement un son étranger à l'accord attendu. Ce son est caractéristique du phénomène de battements. Expérimentalement, on remarque que les battements perçus sont modifiés quand les hauteurs des notes jouées se rapprochent. Lorsque les deux instruments sont pleinement accordés, le phénomène de battement disparaît complètement.

L'expression des ondes stationnaires dans le tuyau est la suivante :

$$\xi(x,t) = 2A \cos \omega((L-x)/c) \cdot \sin \omega(t-L/c)$$

Que l'on peut éventuellement réécrire :

$$\xi(x,t) = A'(t) \cdot \cos \omega((L-x)/c) \text{ avec } A'(t) = 2A \cdot \sin \omega(t-L/c)$$

$A'(t)$ peut être considéré comme l'amplitude de l'onde stationnaire, cette amplitude variant au cours du temps.

La fréquence caractérisant la hauteur de la note associée étant : $f = \omega/2\pi$.

Supposons que deux musiciens tentent de jouer une même note caractérisée par une fréquence f_0 et donc une pulsation $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$, sans y parvenir réellement. L'un des musicien joue une note de pulsation $\omega_0 - \Delta\omega$, l'autre une note de pulsation $\omega_0 + \Delta\omega$ (avec $\Delta\omega \ll \omega_0$).

Supposons pour simplifier que les amplitudes $A'(t)$ des deux ondes sont identiques, ce qui ne modifie pas beaucoup le problème. L'auditeur entend alors une onde acoustique ξ_a qui est la somme des deux ondes émises ξ_1 et ξ_2 :

$$\xi_a(x,t) = \xi_1(x,t) + \xi_2(x,t)$$

$$\Leftrightarrow \xi_a(x,t) = A'(t) \cdot \cos [(\omega_0 - \Delta\omega)(L-x)/c] + A'(t) \cdot \cos [(\omega_0 + \Delta\omega)(L-x)/c]$$

$$\Leftrightarrow \xi_a(x,t) = A'(t) \cdot \{ \cos [(\omega_0 - \Delta\omega)(L-x)/c] + \cos [(\omega_0 + \Delta\omega)(L-x)/c] \}$$

$$\Leftrightarrow \xi_a(x,t) = 2A'(t) \cos [\omega_0 \cdot (L-x)/c] \cos [\Delta\omega \cdot (L-x)/c]$$

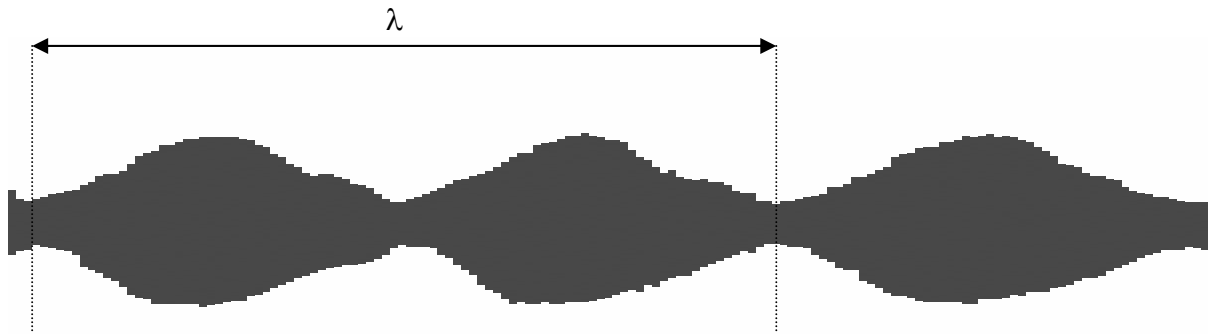
$$\Leftrightarrow \xi_a(x,t) = 2A''(t) \cos [\omega_0 \cdot (L-x)/c]$$

$$\text{Avec } A''(t) = 2A'(t) \cos [\Delta\omega \cdot (L-x)/c]$$

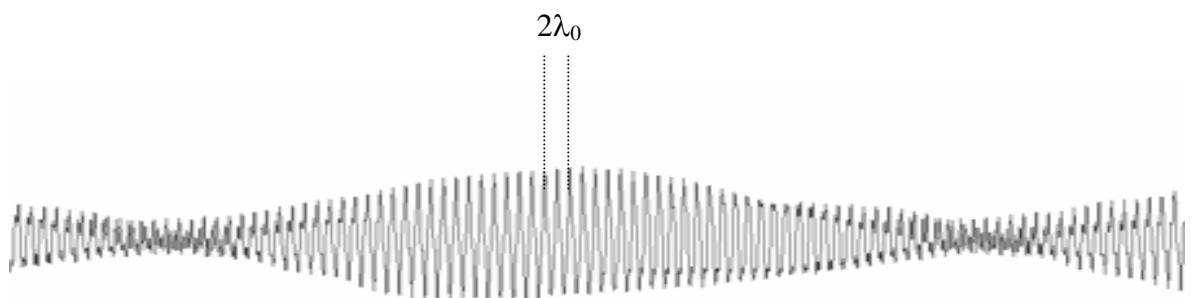
Tout se passe pour l'auditeur comme s'il recevait une onde de pulsation ω_0 mais dont l'amplitude varie à la pulsation $\Delta\omega$. Le phénomène est interprété par le cerveau comme la superposition de deux phénomènes périodiques, l'un correspond à la note espérée par les musiciens à la pulsation ω_0 , l'autre est un phénomène de pulsation $\Delta\omega$ interprété comme un son à cette pulsation. Plus l'écart des deux notes effectivement jouées est petit, plus $\Delta\omega$ est petit, donc plus la fréquence du phénomène correspondant est petite. Lorsque les deux notes sont justes, $\Delta\omega$ est nul, l'amplitude de l'onde reçue A'' n'est plus modulée.

On peut visualiser ces résultats en observant la forme de l'onde lors d'un phénomène de battements. J'ai réalisé un enregistrement de deux flûtes soprano jouant un la 880Hz en produisant un phénomène de battement puis en accordant progressivement les flûtes.

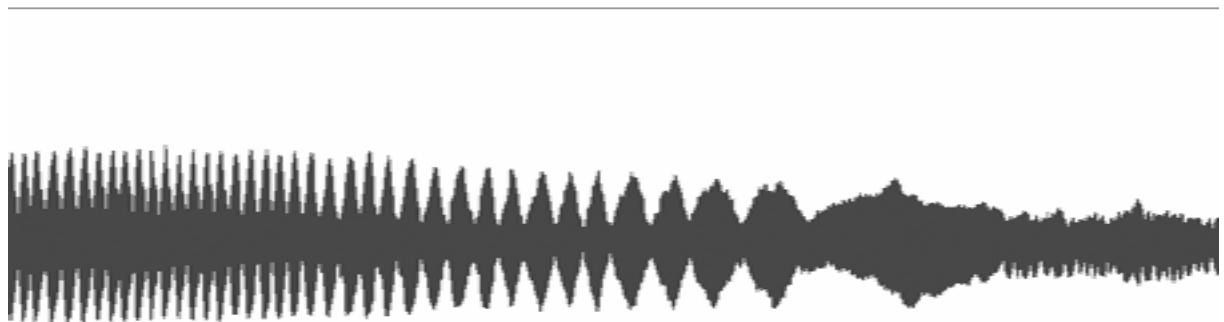
Voici les différentes formes d'ondes obtenues en dilatant plus ou moins les échelles :



Phénomène de battement, visualisation de l'enveloppe des battements à la pulsation $\Delta\omega$, donc de longueur d'onde $\lambda=2\pi c/\Delta\omega$.



Phénomène de battement, intérieur de l'enveloppe à la pulsation ω_0 , donc de longueur d'onde $\lambda_0=2\pi c/\omega_0$. ($\lambda_0 < \lambda$ car $\Delta\omega \ll \omega_0$).



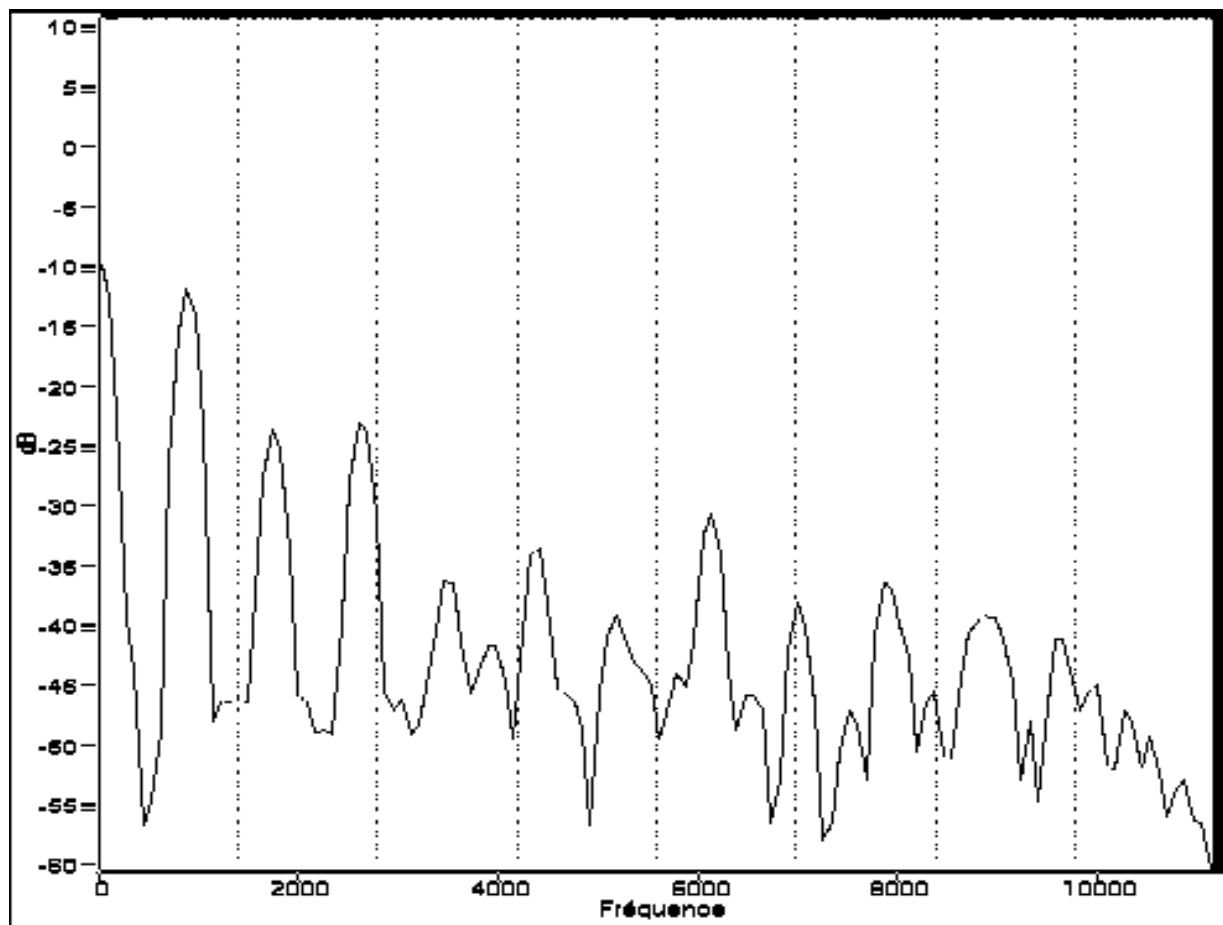
Phénomène de battement, évolution lors de l'accord, $\Delta\omega$ diminue donc λ augmente

L'allure des courbes obtenues confirme la validité des calculs et l'expression des ondes proposés dans la partie précédente. Il faut tout de même remarquer que dans le calcul, on a supposé que les amplitudes des deux ondes émises étaient les mêmes. Or les amplitudes dépendent de $\sin \omega(t-L/c)$, donc comme les pulsations sont différentes ($\omega_0+\Delta\omega$) et ($\omega_0-\Delta\omega$) les amplitudes n'ont pas la même évolution au cours du temps. Parfois l'amplitude de la

première onde jouée sera nulle et l'auditeur ne percevra plus le phénomène de battement, parfois celle de la seconde onde sera nulle et il n'y aura pas de battements, parfois enfin les amplitudes seront maximales et le phénomène de battement sera très marqué. Cette remarque explique en partie le fait que la seconde courbe présentée n'est pas très régulière. Par ailleurs, il faut tenir compte du fait que les ondes émises ne sont pas strictement sinusoïdales.

II- Harmoniques de la flûte à bec

Si les harmoniques sont moins importants dans les flûtes que dans certains autres instruments, ils n'en sont pas pour autant inexistant ! Ils sont très visibles dans le spectre suivant et montent souvent très haut dans le cas de la flûte à bec :



Spectre du LA 880 médium de la flûte à bec soprano Moeck

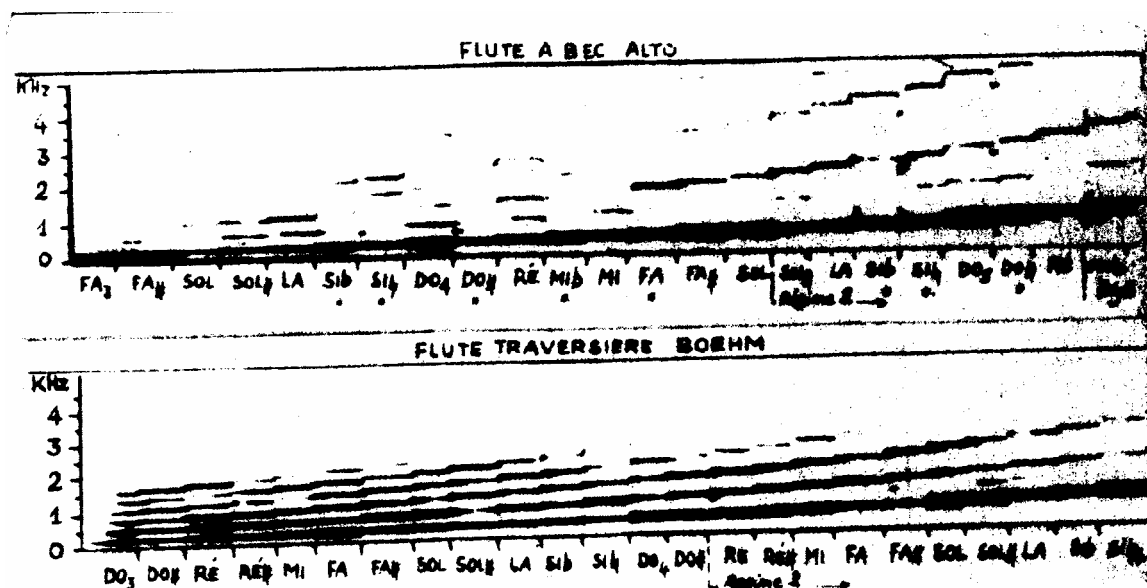
Notons dans cette illustration que le premier pic, qui correspond au fondamental, est très élevé (le pic centré sur 0 Hertz correspond à du bruit de fond). Entre le premier et le second pic, l'intensité chute d'environ 15 dB (décibel). Cela revient à dire que le second harmonique est 32 fois moins puissant que le premier¹⁴. Ce spectre est conforme à l'affirmation de Michèle Castellengo quant au fait que l'énergie est à 80% concentrée dans le fondamental. Cependant la présence de nombreux autres pics, confirme l'existence de nombreux harmoniques.

¹⁴ voir annexe n°2 Echelle en décibels

A titre de repère, rappelons que l'oreille humaine n'entend que les sons compris entre 20 et 20000 Hertz. On a choisi ici de représenter un spectre qui balaye les fréquences allant de 0 à 10000 Hertz, tous ces harmoniques sont donc perçus lorsque l'on entend un LA joué à la flûte à bec et leur rôle est très important car ils contribuent au timbre de l'instrument. En mesurant la position des différents pics obtenu sur le spectre on peut vérifier que le fondamental est situé à la fréquence $f_1=880\text{Hz}$, ce qui correspond bien au LA joué, on vérifie également, avec une très bonne précision que les harmoniques sont situés aux fréquences $2f_1, 3f_1, 4f_1, \dots$ comme prévu par la décomposition en séries de Fourier.

III- Evolution du spectre lors d'un chromatisme

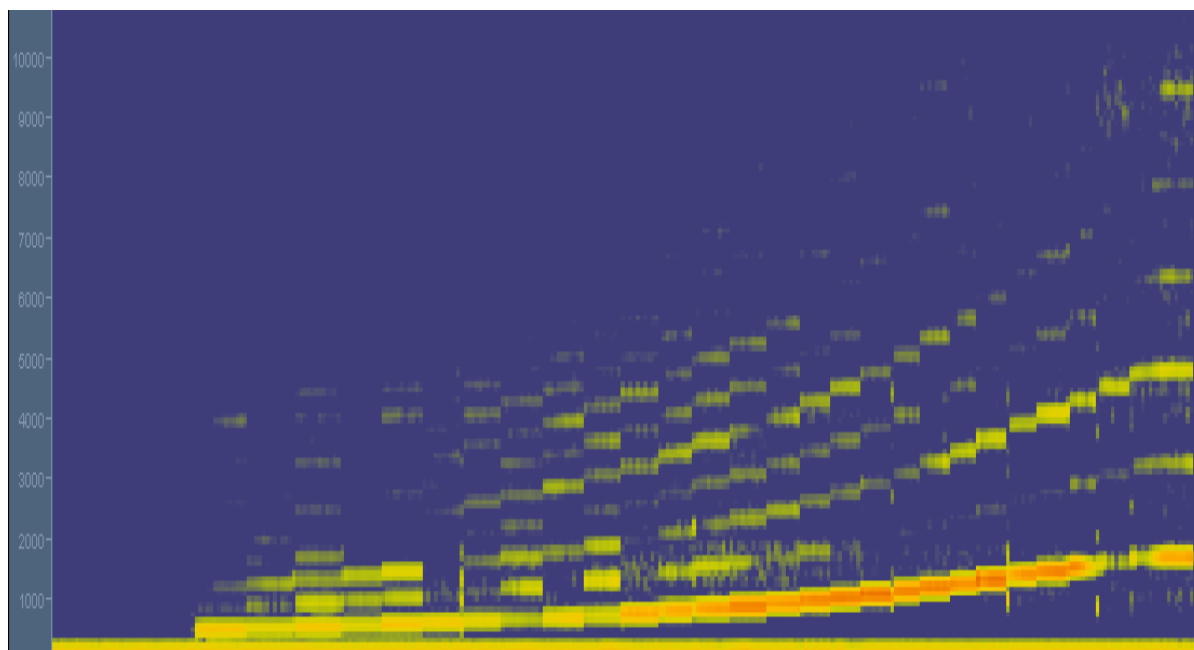
L'analyse spectrale permet-elle de différencier les doigtés de la flûte à bec ? Dans son article, Michèle Castellengo¹⁵ affirme que les doigtés de fourche sont une caractéristique de la flûte à bec. On entend par doigtés de fourche le fait de reboucher des trous inférieurs à un ou deux trous laissés ouverts. L'usage de ces doigtés rend le jeu de la flûte à bec plus difficile surtout lorsqu'ils doivent être enchaînés rapidement. Les flûtes traversières, quant à elles, possèdent des clés qui leurs permettent de les éviter. Afin de mettre en évidence cette caractéristique Michèle Castellengo¹⁶ a cherché à obtenir les spectres d'une gamme chromatique jouée legato à la flûte à bec d'une part et à la flûte traversière d'autre part afin d'en établir une comparaison. J'ai pour ma part tenté d'obtenir à mon tour le spectre pour la flûte à bec. On présente ci-dessous les spectres obtenus :



Evolution du spectre lors d'une gamme chromatique jouée à la flûte à bec et à la flûte traversière. Caractérisation des doigtés de fourches de la flûte à bec. (M. Castellengo.)

¹⁵ voir bibliographie [Michèle Castellengo]

¹⁶ voir bibliographie [Michèle Castellengo]



Evolution du spectre lors d'une gamme chromatique jouée à la flûte à bec
Caractérisation des doigtés de fourche de la flûte à bec.

Ces spectres sont différents de celui utilisé précédemment car on a choisi de voir l'évolution des harmoniques en fonction du temps c'est-à-dire au fur et à mesure du déroulement de la gamme. L'intensité des harmoniques est représentée ici par l'épaisseur des traits. Plus l'intensité est grande, plus le trait est épais. Dans cette présentation, l'échelle de fréquence se retrouve en ordonnée. Le fondamental est donc en bas et les harmoniques se répartissent au-dessus, en fonction de leur fréquence.

Il apparaît tout de suite que le spectre de la flûte traversière est plus riche en harmoniques. Ces derniers ont une intensité plus grande et se répartissent de façon continue. Une telle homogénéité ne se retrouve pas dans le spectre de la flûte à bec. Dans ce cas, le seul trait continu sur toute l'étendue de la gamme est celui du fondamental. A chaque fois que le son correspond à un doigté de fourche (signalés par des astérisques sur le graphique), on constate un appauvrissement brutal en harmonique. Cette discontinuité caractérise la flûte à bec : son timbre varie en fonction du doigté utilisé.

On peut se demander à quoi est due cette chute du nombre d'harmoniques lors de l'exécution d'un son de fourche. Le modèle simplifié établi en première partie de ce mémoire peut nous donner quelques éléments de réponse : Le doigté de fourche installe un trou ouvert au milieu du tuyau. Ce trou impose donc à son endroit un nœud de pression. Or on a vu, au premier chapitre, qu'à un nœud de pression, correspond un ventre de déplacement. Seules les harmoniques dont la longueur d'onde permet d'avoir un ventre de déplacement à l'endroit du trou peuvent s'établir ; les autres sont dans ce modèle physiquement impossible donc disparaissent. Bien entendu, cette explication est très succincte car de nombreux autres facteurs n'ont pas été pris en compte.

IV- Mise en évidence de la différence entre les registres.

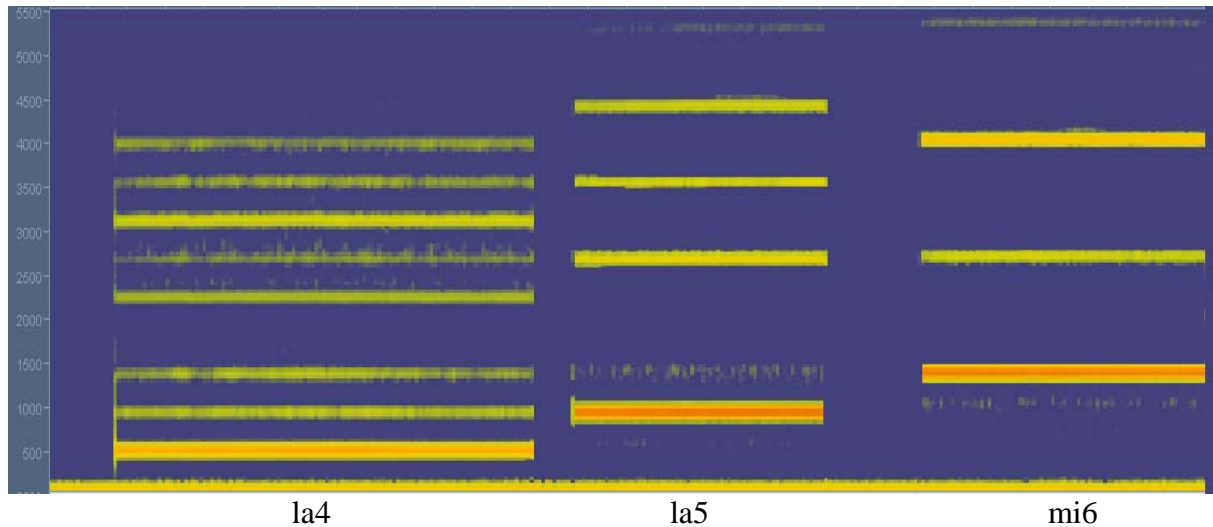
Dans le paragraphe précédent, nous avons expliqué les brusques diminutions du nombre d'harmoniques par la présence des doigtés de fourche. Si on observe le spectre de la page précédente, on constate cependant que cet appauvrissement de timbre est présent sur toute la fin de la gamme, à partir du LA aigu. On ne peut donc plus, sur le haut du spectre, expliquer les chutes par la seule présence des doigtés de fourche puisque les harmoniques disparaissent aussi pour les doigtés « normaux ». Cette modification du spectre s'explique par les changements de registre.

On définit les différents registres d'utilisation de la flûte à bec par les partiels utilisés. Lorsque l'on joue un LA le plus grave possible sur la flûte en FA (alto), il correspond au premier registre. Ce son se compose d'un fondamental (LA grave) et d'une série d'harmoniques (LA à l'octave supérieur puis MI situé une octave plus une quinte au-dessus du fondamental...). Lorsqu'ensuite on joue le LA à l'octave supérieure, cela revient à jouer le second harmonique du premier LA, on dit que cette note appartient au deuxième registre. Ensuite lorsqu'on joue le MI (une octave + une quinte) au-dessus du premier LA, cela correspond au troisième harmonique donc au troisième registre. En réalité du fait de la fabrication de la flûte à bec à huit trous, l'extension des registres est légèrement différente d'une octave pour permettre des recouvrements de registres et limiter les modifications de timbre, cela permet également de limiter l'utilisation de doigtés compliqués notamment lors des trilles aux frontières des registres. Selon Philippe Bolton, facteur de flûte à bec que j'ai interrogé, on considère que le premier registre sur une flûte en FA s'étend du FA grave au deuxième SOL, le deuxième registre s'étend du deuxième SOL dièse au deuxième RE, le troisième registre s'étend du deuxième MI bémol au troisième FA. Le troisième SOL appartient au quatrième registre.

Pour faciliter l'émission de notes dans les registres supérieurs de la flûte, on a ajouté sur la flûte un trou que le pouce peut boucher ou non, on le nomme parfois trou de registre¹⁷. Tant que le pouce bouche le trou on obtient la note fondamentale. Pour passer au registre supérieur, on peut souffler plus fort (mais c'est très difficile d'émettre un son propre de cette manière) ou bien provoquer l'ouverture d'une petite partie du trou de registre ce qui impose de nouvelles conditions aux différentes ondes pouvant s'installer dans la flûte; l'établissement du fondamental devient impossible et on obtient une note du registre supérieur. Si le trou de registre aide grandement le musicien à jouer les aigus, il a aussi l'inconvénient de modifier le timbre de l'instrument. Observons, pour s'en convaincre, le spectre obtenu en jouant successivement un LA médium, un LA aigu et un MI aigu à la flûte à bec alto :

¹⁷ voir bibliographie[Michèle Castellengo]

Notes du 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} registre



Pour faciliter la lecture, on a gommé les parasites obtenus sur le spectre pour ne conserver que les harmoniques facilement identifiables. On constate que les spectres des la5 et mi6 sont constitués de certains des harmoniques du spectre du la4. On vérifie bien la nomenclature proposée par P.Bolton, le la5 ayant pour fondamental le premier harmonique du la4 (une octave au-dessus) appartient au deuxième registre, le mi6 ayant pour fondamental le second harmonique du la4 (une octave plus une quinte au-dessus) appartient au troisième registre. On constate également que les spectres des second et troisième registres paraissent plus pauvres que celui du premier registre, ce qui peut expliquer la sensation de changement de timbre.

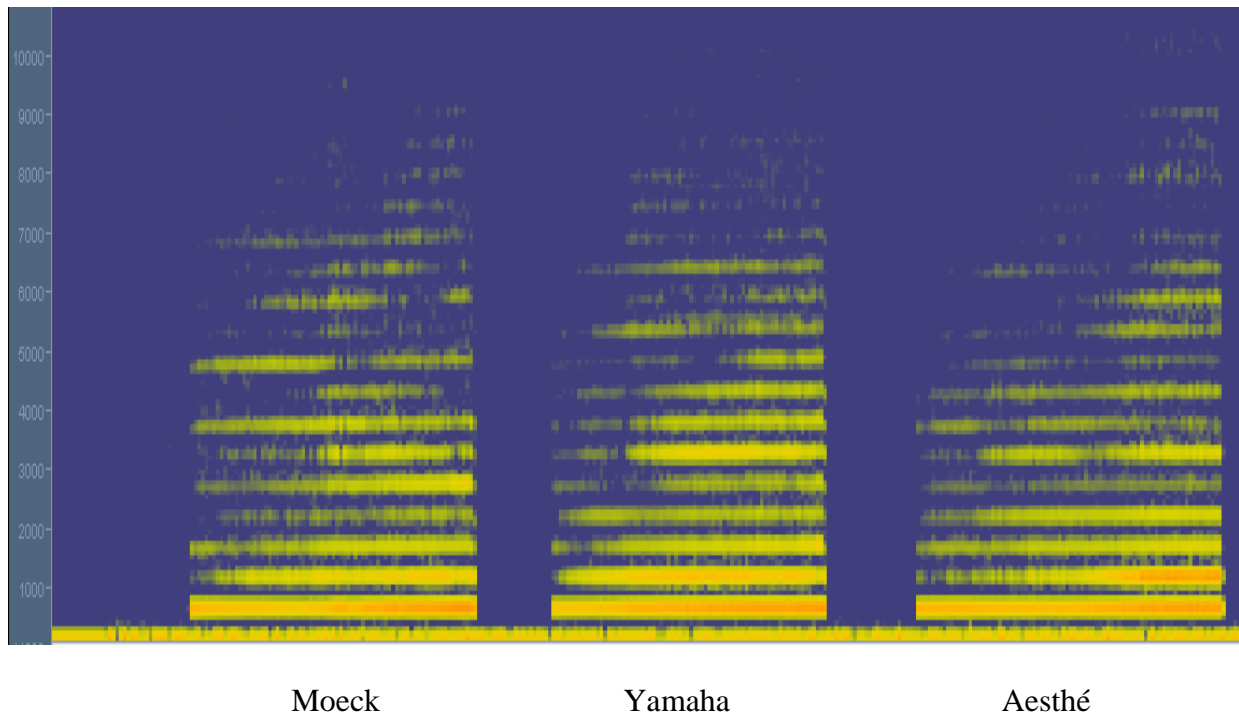
V- Influence de la position de la bouche sur le timbre

V-1. Evolution du spectre en fonction de la position du palais

Par souci d'améliorer la qualité du son, le flûtiste travaille souvent sur la position de sa bouche. De la même manière que le timbre du chanteur varie en fonction des voyelles qu'il prononce, le timbre de la flûte à bec peut être sensible à la façon dont le musicien positionne son palais lorsqu'il souffle dans son instrument. Afin de maîtriser cette notion, le flûtiste se représente souvent les différents timbres qu'il obtient par des images très personnelles : certains parleront de chaleur, d'autre imagineront des couleurs... Jouer jaune peut alors, par exemple, signifier tendre la bouche de façon à élever la position du palais et obtenir un timbre plus riche.

Il est donc intéressant de savoir si cette idée, qui se fonde essentiellement sur des sensations personnelles, est justifiable par la physique. La variation de position du palais influence-t-elle le timbre de façon suffisamment éloquente pour que cela puisse apparaître sur un spectre ? Pour y répondre, j'ai enregistré un Do médium à l'alto, sur trois flûtes différentes. Au fur et à mesure que je jouais, j'ai pris soin de prendre une position de palais de plus en plus haute. Le traitement de cet échantillon par l'ordinateur m'a permis d'obtenir le spectre suivant :

Evolution du timbre sur un do joué à la flûte à bec alto.



On constate, au fur et à mesure de mon effort sur ma position de bouche, que des nouveaux harmoniques apparaissent. Cela vient conforter les impressions des musiciens. En revanche, cette expérience ne permet pas vraiment de visualiser les qualités d'un instrument. En effet, les spectres des trois flûtes se ressemblent beaucoup. Certes, on observe que le dernier spectre correspondant à ma meilleure flûte (Aesthé) a peut être la plus belle évolution mais on voit peu de différences entre ma flûte en bois Moeck et ma flûte en plastique Yamaha. Sans compter que pour réaliser l'échantillon, j'ai recommencé trois fois l'exercice sur mon palais. Il est certain que je ne pouvais pas reproduire cet effort à l'identique. Enfin, il m'était peut être plus facile de réaliser ce spectre avec ma flûte Aesthé, puisque c'est l'instrument avec lequel j'ai le plus travaillé cette notion !

Si on voulait mettre en évidence la réponse de différents instruments en fonction de la position de la bouche, on pourrait envisager l'emploi d'une « bouche artificielle ». Cette dernière permet de reproduire à l'identique un certain nombre de facteurs tels que la taille de la cavité buccale, sa forme, le débit d'air, sa direction... Autant de paramètres de jeu qui influent sur le résultat et qui sont impossibles à contrôler séparément par un véritable instrumentiste. Une telle « bouche » a par exemple été utilisée par les physiiciens Jean-Pierre Dalmond, Joël Gilbert et Jean Kergomard lors d'expériences sur l'harmonicité d'une trompette¹⁸. Un tel système leur permettait de réaliser des mesures inaccessibles avec un musicien : tenue de la même note pendant plusieurs secondes, conservation des paramètres de jeu d'une note à l'autre, mesures de pression et de vitesse à l'intérieur du bec ou de la cavité buccale, suivi du mouvement des lèvres...

¹⁸ voir bibliographie [Jean pierre Dalmond]

V-2. Présentation et reproduction de l'expérience de Dan Laurin¹⁹

Le flûtiste Dan Laurin a mené, une recherche sur l'influence de la position de la bouche sur le timbre de ses flûtes à bec. En tant qu'instrumentiste, dans le but d'améliorer son interprétation, il travaille cette notion depuis plus de 25 ans. En qualité de professeur, il a eu du succès en transmettant à ses élèves les outils pour changer délibérément le timbre d'une flûte. Cependant, la rencontre de quelques personnes sceptiques à l'idée qu'une position vocale puisse affecter le timbre l'a motivé pour formuler ses pensées d'une façon plus précise. Afin de légitimiser ses dires, il a participé à une expérience scientifique qu'il a décrite dans l'article cité en référence. Son objectif y est d'étudier le lien entre différentes configurations de son appareil vocal (forme de la bouche, position du palais et de la langue...) et le timbre de son instrument. Selon lui, une même « configuration vocale » (*vocal tract*) dans un même registre produit les mêmes effets de timbre quelle que soit la flûte utilisée. Son but est d'étudier ces différentes configurations vocales et leurs effets en termes d'analyse spectrale. Dans cet objectif, il souhaite les comparer aux configurations vocales employées pour émettre des sons oralement, par exemple des voyelles. L'avantage de telles comparaisons est qu'il est ensuite facile d'imiter les configurations correspondantes. Il y a cependant une difficulté qui réside dans le fait qu'à la différence de la parole, le son est produit à l'extérieur du corps humain par l'intermédiaire de l'instrument. Aussi est-il plus compliqué de sentir les effets d'un effort vocal sur le son émis par la flûte que sur le son émis par la voix directement.

Pour cette étude, Dan Laurin s'est associé à deux physiciens J. Wolfe et J. Smith ainsi qu'à un technicien J. Tann. Avec leur aide il a conçu et mis en œuvre des expériences pour formaliser ses idées. Il y a deux choses à expérimenter : d'une part préciser l'effet des différentes configurations vocales sur le timbre du son émis et vérifier que cet effet est reproductible lorsqu'on change d'instrument, d'autre part voir si cet effet est le même que celui obtenu sur le spectre de la voix directement.

Auparavant l'équipe des physiciens avait mis au point, pour d'autres recherches²⁰, un dispositif permettant de décrire la configuration vocale en donnant le spectre du son qui serait émis par la voix dans cette configuration. Ce spectre correspond, dans les expériences de Dan Laurin, à celui du signal entrant dans la flûte (il ne correspond pas à un signal sonore effectivement émis, mais à celui d'un signal qui serait émis par la voix avec la même configuration vocale). En plus de ce dispositif, à l'aide d'un microphone fixé sur la flûte, ils pouvaient visualiser le spectre du son de l'instrument. En observant le spectre du signal sortant de la flûte, on peut visualiser l'effet des configurations vocales sur le timbre de l'instrument. En comparant les spectres des signaux entrant et sortant de la flûte, on peut voir si les effets d'une configuration donnée sont les mêmes sur la voix et sur le timbre de l'instrument. Si c'est le cas la comparaison des configurations vocales avec celles utilisées pour les voyelles serait justifiée.

Pour simplifier le problème, les expérimentateurs ont étudié deux configurations vocales distinctes nommées *thick* (épais) et *thin* (fin). La configuration *thick* est obtenue lorsque le musicien imite la voyelle a (comme dans *come*), le palais étant relativement relaxé. La configuration *thin*, quant à elle, correspond à l'imitation d'un bâillement, l'interprète cherchant à lever au maximum la position de son palais.

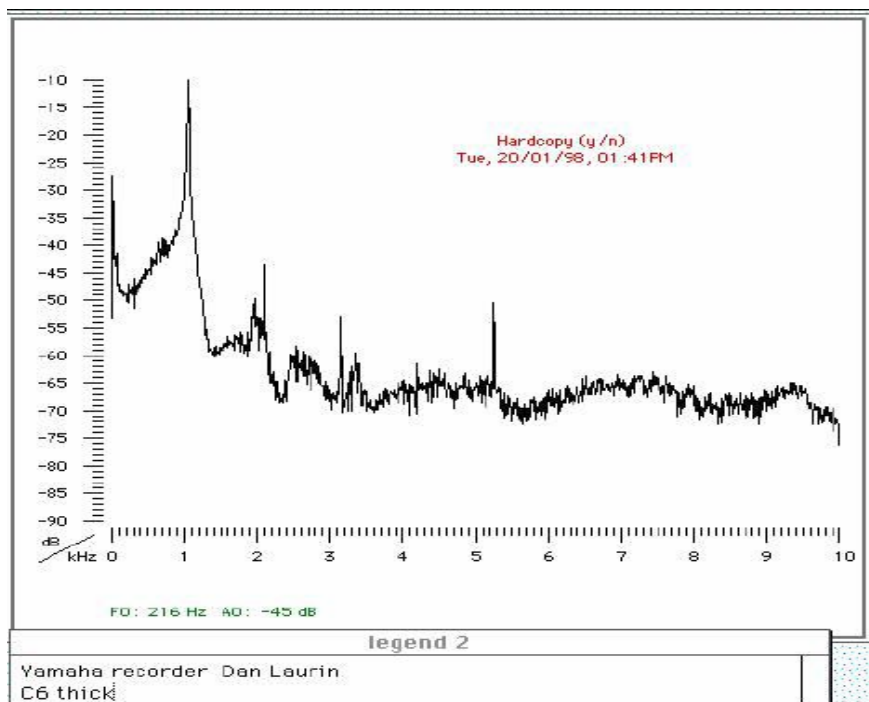
La description des configurations en terme de voyelles par Dan Laurin mène dans un premier temps l'équipe scientifique dans une mauvaise direction : A ce stade de l'expérience le

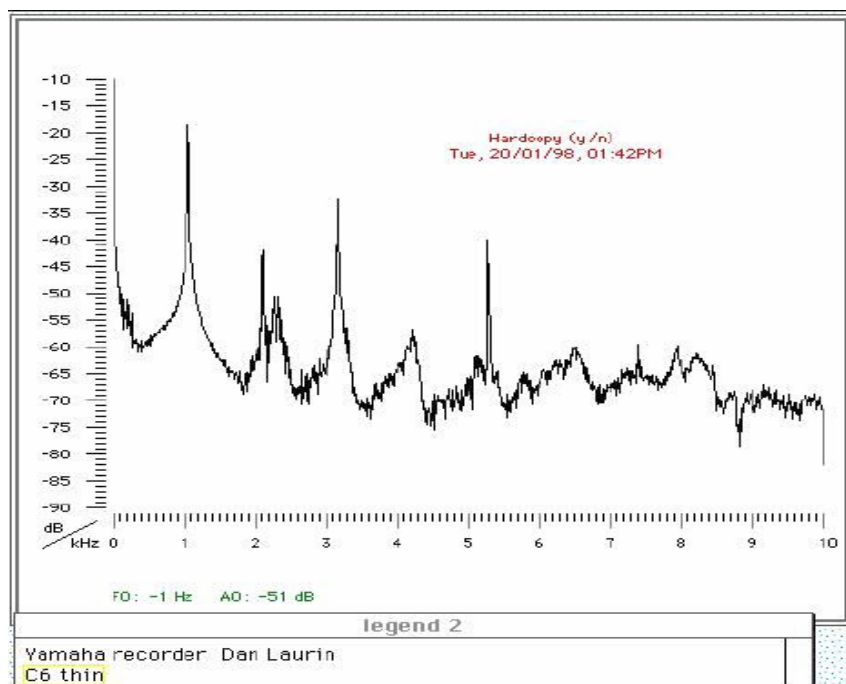
¹⁹ voir bibliographie [Dan Laurin]

²⁰ recherches appliquées à la thérapie ou à l'apprentissage du langage.

montage permet d'examiner l'étendue des fréquences qui caractérisent les différentes voyelles c'est à dire entre 300 Hz et 3.5 kHz. Ils ont alors remarqué que dans cette gamme de fréquences, les deux configurations vocales retenues produisent un immense changement dans le spectre de la cavité buccale mais n'instaurent pas de différences significatives et reproductibles dans le spectre du son de la flûte. Si la configuration vocale doit agir de façon similaire sur la voix et sur la flûte, il faut regarder dans une gamme de fréquence beaucoup plus élevée. Les changements sur le timbre de la flûte sont peut être plus marqués dans les hautes fréquences.

Les scientifiques affichent donc les spectres de la flûte dans une échelle plus vaste, jusqu'à 10 kHz. Tous les spectres montrent alors des différences reproductibles claires sur une grande série de notes et d'instruments. Les deux spectrogrammes suivants ont été retenus :





Le timbre « *thin* » présente un graphe complètement différent de celui du timbre « *thick* ». Beaucoup de ses harmoniques sont plus intenses. On a mesuré sur les graphes obtenus par Dan Laurin, les hauteurs des différents pics :

	<i>Thick</i> (en dB)	<i>Thin</i> (en dB)
Fondamental	-10	-17
1 ^{ère} harmonique	-44	-42
2 nd e harmonique	-53	-32
3 ^{ième} harmonique	-62	-57
4 ^{ième} harmonique	-51	-40
5 ^{ième} harmonique	bruitée	-61
6 ^{ième} harmonique	bruitée	-60

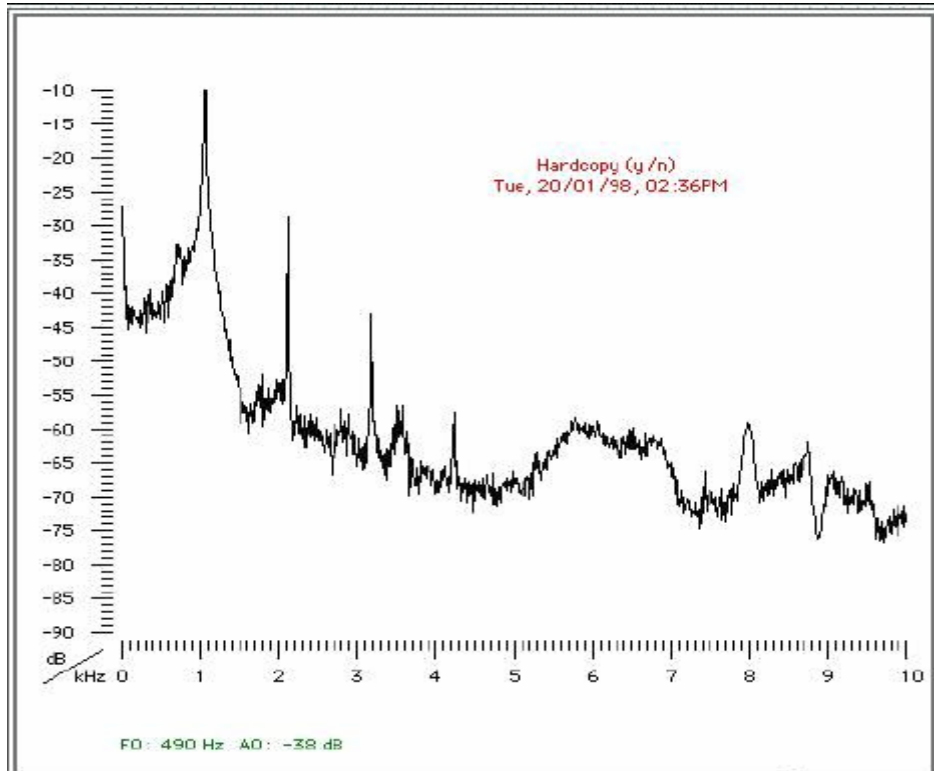
On remarque que le pic du fondamental est moins intense sur le timbre « *thin* ». En revanche, les harmoniques de ce dernier sont nettement plus intenses. Les différences d'amplitudes sont très significatives au niveau des harmoniques 2 et suivantes, les harmoniques 5 et 6 étant complètement inexistantes dans le timbre « *thick* ». En conclusion, on peut déjà dire que le timbre « *thin* » réparti mieux l'énergie entre le fondamental et les harmoniques alors que le son « *thick* » concentre l'énergie dans le fondamental et dans le bruit.

Le bruit, représenté ici par l'épaisseur du graphe est considérablement réduit dans le timbre « *thin* ».

Si on compare les graphiques de façon plus globale, on remarque qu'ils diffèrent considérablement au delà de 5 kHz. C'est apparemment l'endroit où le timbre change de la façon la plus audible. Le timbre « *thick* » est caractérisé par un bruit important. Ce bruit correspond, à l'audition, au bruit blanc dans le vocabulaire des flûtistes, c'est à dire à la partie venteuse qui accompagne plus ou moins l'émission d'une note à la flûte à bec. Il est présent tout le long du graphe jusqu'aux fréquences de 10kHz. Bien que les harmoniques soient aussi présentes au delà de 5 kHz, le bruit est toujours plus large et cache ces dernières. Au contraire, le bruit est très atténué dans le spectre du son « *thin* », on peut donc voir apparaître sur ce dernier des pics harmoniques marqués dans la tranche des 6-8 kHz.

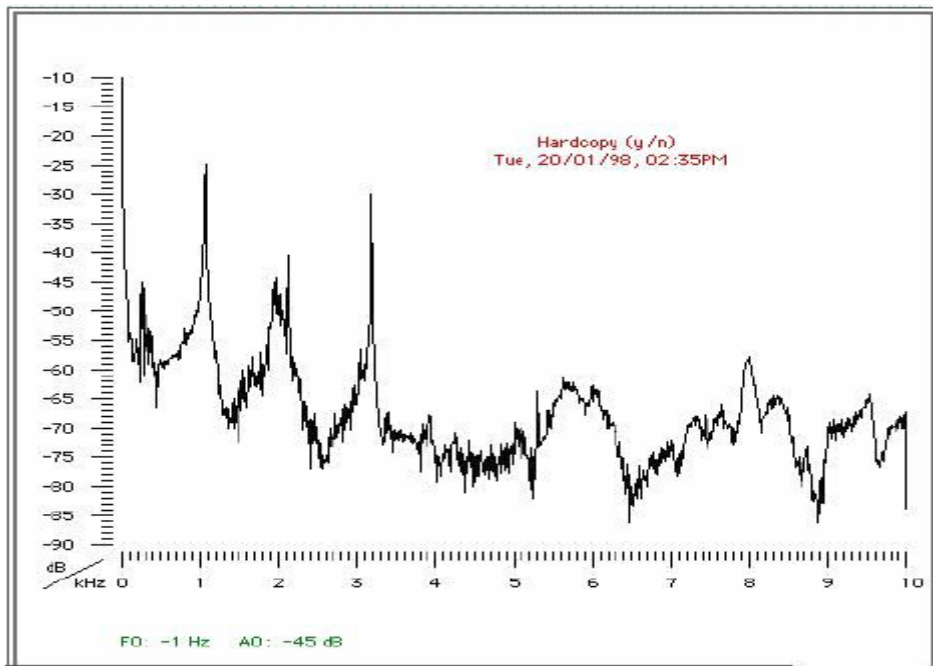
La suite de l'expérience consiste à rechercher si on peut voir des résultats similaires sur les spectres du signal de la cavité buccale. L'équipe de scientifiques a réalisé une série d'expériences dans lesquelles ils affichaient simultanément le spectre du timbre de la flûte et celui de la cavité buccale de Dan Laurin pendant qu'il jouait et exécutait les deux configurations vocales opposées

Les spectres de la cavité buccale montrent alors aussi des différences notables dans la région des 6-8 kHz. Des essais sur une gamme chromatique leur ont permis de constater que le résultat ne dépendait pas du ton. En équipant une seconde flûte en la 403 du même dispositif, ils ont pu retrouver des résultats similaires :



legend 2

Yamaha recorder: Dan Laurin's VT
C6 thick 3



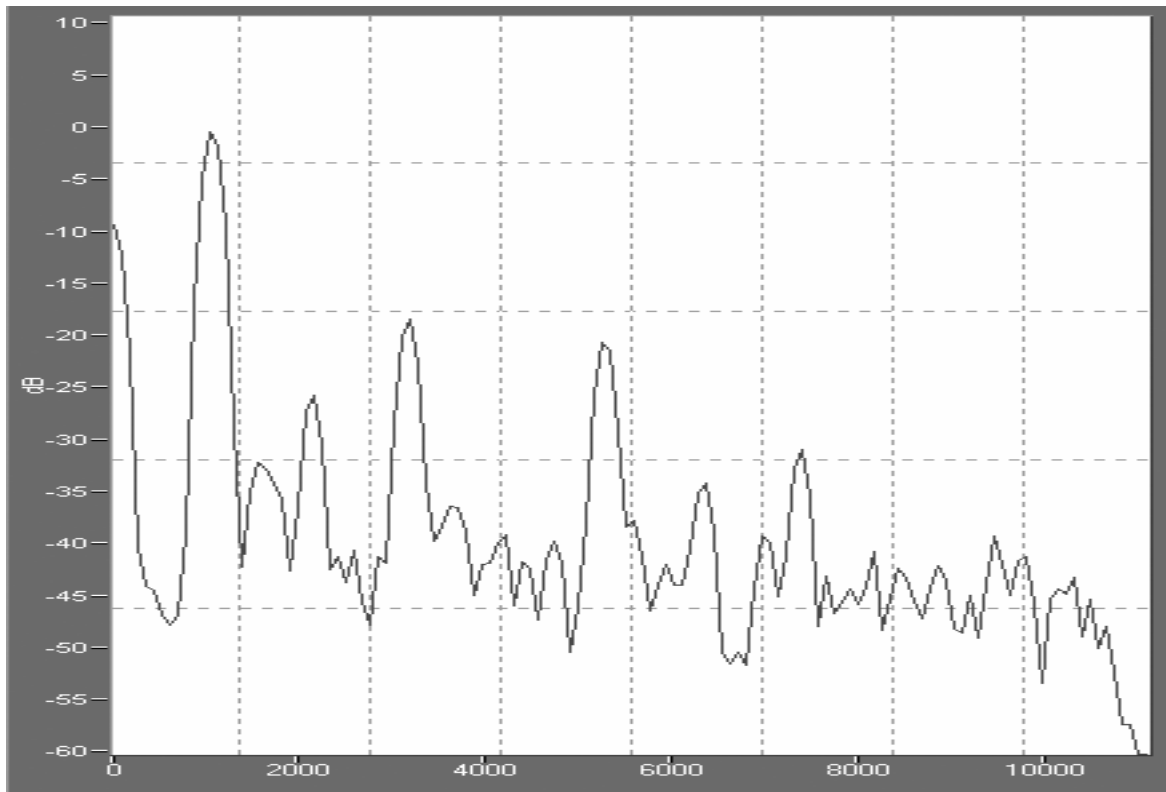
legend 2

Yamaha recorder: Dan Laurin's VT
C6 thin 3

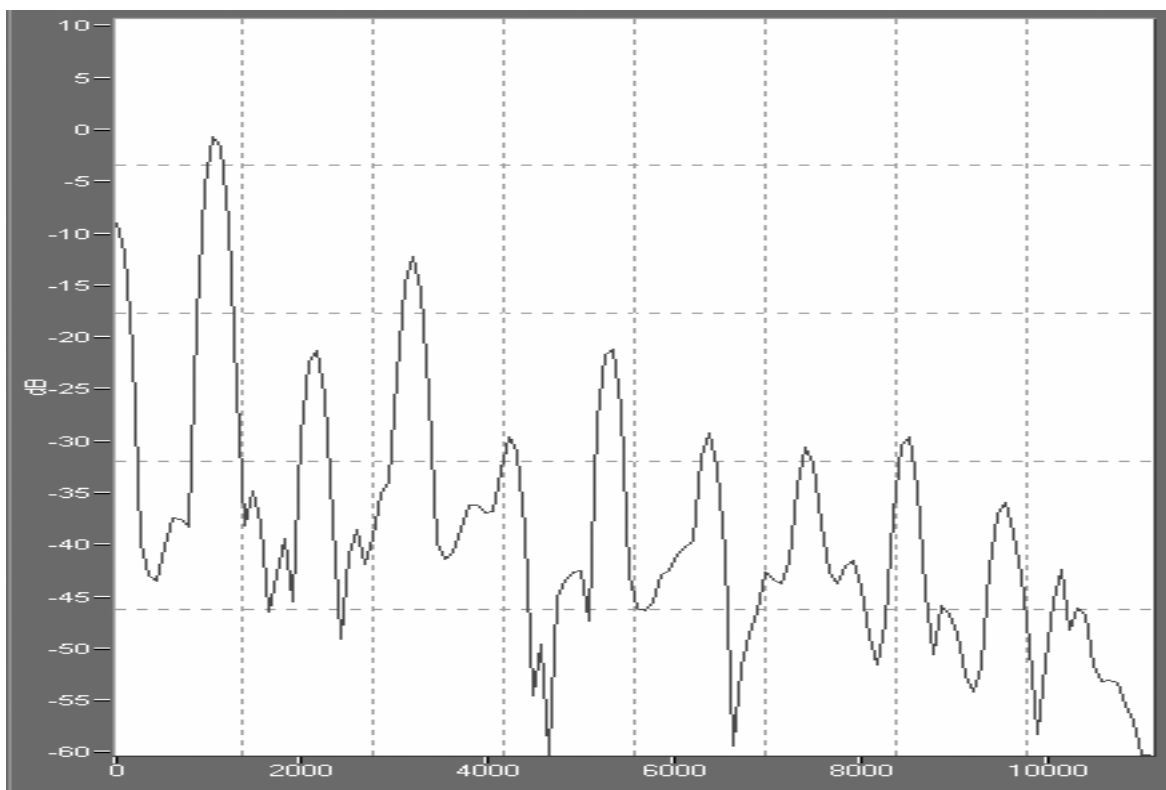
En conclusion, au vu de ces résultats, on peut dire que la production de différents timbres à la flûte à bec est liée à l'effort fait par l'instrumentiste pour modifier la forme de sa cavité buccale. Mais il s'agit d'un lien complexe plus que d'un effet direct puisque dans un spectre vocal, les différences sur le timbre des différentes voyelles se retrouvent surtout dans la zone de fréquences inférieures à 3.5 kHz ; tandis que le timbre de la flûte à bec est davantage modifié dans des régions de hautes fréquences. Dans tous les cas, on retient que différentes configurations vocales associées à différentes voyelles produisent des réponses différentes dans les hautes fréquences et donc des effets de timbre dans le son de la flûte à bec.

L'interprétation de ces variations de timbre par des modifications de la configuration vocale proposée par les expérimentateurs repose essentiellement sur la notion de turbulence évoquée dans la première partie de ce mémoire. En complément de leurs expériences, ils ont effectué des mesures de pression sur le flux d'air entrant dans la flûte. Ils ont ainsi pu observer que dans la configuration *thin*, le musicien envoie un jet d'air dont la pression est 10% inférieure à celle nécessaire pour la configuration *thick*. Cette différence de pression fait que l'on crée un écoulement dans la fenêtre moins turbulent dans la configuration *thin* que dans la configuration *thick*. Cette différence entre les jets au niveau de la fenêtre peut expliquer, selon eux, l'apparition d'un bruit plus important dans la configuration *thick*.

J'ai pour ma part voulu voir si je pouvais retrouver certains des résultats de Dan Laurin et de ses associés. Etant donné que je n'avais pas le dispositif permettant d'afficher le spectre de la cavité buccale (Dan Laurin affirme dans son article qu'il s'agit d'une technologie unique ?) je me suis contentée d'afficher les spectres du son de ma flûte à bec. Je me suis efforcée pour mes deux échantillons de produire deux configurations vocales distinctes (palais relaxé et palais élevé) sur un do6 :



Do6 palais relaxé (C6 thick)



Do6 palais élevé (C6 thin)

Visuellement il apparaît bien que dans la configuration *thin*, on obtient des pics mieux découpés et beaucoup plus marqués que dans la configuration *thick*. Pour confirmer cette impression visuelle on a effectué des mesures sur les amplitudes de ces différents pics.

	<i>Thick</i> (en dB)	<i>Thin</i> (en dB)
Fondamental	0	0
1 ^{er} harmonique	-22,5	-22
2 ^{nde} harmonique	-19	-13
3 ^{ième} harmonique	-35	-30
4 ^{ième} harmonique	-21	-21
5 ^{ième} harmonique	-32	-29
6 ^{ième} harmonique	-30	-30,5
7 ^{ième} harmonique	-35	-30
8 ^{ième} harmonique	-40	-35

Contrairement à celui de Dan Laurin, l'analyseur de spectre dont je me suis servi pour cette expérience utilise une référence relative pour les mesure d'intensité, aussi sur les deux spectres le fondamental est placé à 0dB. Il nous est donc impossible de les comparer. En étudiant les amplitudes des différents pics secondaires, on observe que celles des pics obtenus dans la configuration *thin* sont toujours supérieures ou égales à celles des pics obtenus dans la configuration *thick*. En particulier, on remarque que les harmoniques 2, 3, 5, 7 et 8 dans la configuration *thin* sont à plus de 4dB de ceux de la configuration *thick*, ce qui signifie que ces pics sont au moins deux fois et demi plus intenses.

Dans cette expérience, on peut également identifier le bruit. L'analyseur de spectre étant sans doute moins performant que dans l'expérience de Dan Laurin, les courbes obtenues sont d'apparence lissée (à moins que cela ne provienne d'une qualité d'enregistrement meilleure dans mon expérience, la prise de son se faisant de façon numérique ?). Il n'est donc pas possible d'identifier le bruit par l'épaisseur des courbes obtenues. En revanche, comme la référence d'intensité est la même pour les deux courbes, la position des minima situés entre les pics donne une information sur le bruit de fond. En effet, plus les minima sont bas, plus le bruit est atténué. On a donc relevé la position des minima sur les deux tracés obtenus.

	<i>Thick</i> (en dB)	<i>Thin</i> (en dB)
Fondamental/1 ^{er} harm	-41	-46
1 ^{er} harm/2 ^{nde} harm	-48	-49
2 ^{nde} harm/3 ^{ième} harm	-42	-42
3 ^{ième} harm/4 ^{ième} harm	-48	-60
4 ^{ième} harm/5 ^{ième} harm	-45	-46
5 ^{ième} harm/6 ^{ième} harm	-54	-59
6 ^{ième} harm/7 ^{ième} harm	-54	-52
7 ^{ième} harm/8 ^{ième} harm	-45	-55

En dehors du minima situé entre le 6^{ième} et le 7^{ième} harmonique, tous les minima de la configuration *thin* sont inférieurs à ceux de la configuration *thick*. Cela semble donc

confirmer le fait que le bruit de fond est moins important dans la configuration *thin* que dans la configuration *thick*. C'est sans doute cette atténuation du bruit de fond qui permet aux pics dans la configuration *thin* d'être plus marqués que ceux de la configuration *thick* en particulier dans les fréquences supérieures à 5kHz. Enfin, on retrouve aussi dans la zone 6-8 kHz des différences éloquentes.

On peut donc dire que ces résultats sont en adéquation avec ceux de Dan Laurin. Si ces expériences ne montrent pas un lien direct entre la prononciation des voyelles et le timbre de la flûte à bec, ils permettent néanmoins d'affirmer que les efforts vocaux ne sont pas vains.

Les conséquences significatives et reproductibles de ces efforts à travers la flûte se retrouvent surtout dans les hautes fréquences, à la différence de la voix. Mais les hautes fréquences concernées restent dans un domaine parfaitement audible et les effets sur le timbre sont tout à fait perceptibles par l'auditeur.

VI- Mise en évidence des différentes attaques

La flûte à bec est reconnaissable au bruit de souffle et aux partiels étrangers à la note se produisant au moment de l'attaque. Ce moment, appelé transitoire d'attaque est très important et caractérise à sa façon la flûte à bec. On dit, en effet, qu'un instrument se reconnaît à son attaque. Une attaque de piano accolée à un son de guitare donnerait la sensation d'entendre du piano tout le long de l'écoute.

Le transitoire d'attaque de la flûte à bec a une durée relativement faible. Selon Michèle Castellengo, il va de 30 à 100 ms à la flûte traversière alors qu'il avoisine les 10 ms à la flûte à bec. La précision et la netteté de l'attaque sont donc une des qualités de cet instrument. Les méthodes anciennes et modernes de flûte à bec décrivent une quantité d'articulations variées que l'instrumentiste emploie pour donner vie à son jeu. S'il souhaite « durcir » son interprétation, il emploiera des attaques dures telles que : Te, Ke... . S'il souhaite au contraire une mélodie « coulante » il optera pour des attaques douces : Le, Ne, Re... .

Ces différentes articulations étant fondamentales dans l'interprétation d'un morceau à la flûte à bec, j'ai voulu savoir si ces attaques étaient reconnaissables dans l'affichage de la forme d'onde. J'ai donc enregistré plusieurs échantillons de La à la flûte soprano, chaque enregistrement présentant une attaque différente. Voici les formes d'ondes correspondantes :



Sans mouvement de langue



Attaque « de »



Attaque « ge »



Attaque « le »



Attaque « ne »



Attaque « re »



Attaque « te »

On remarque une certaine ressemblance entre les attaques dures De et Te, ainsi qu'entre les attaques douces Le et Ne. L'attaque Re introduit un signal périodique très caractéristique. Il est donc possible de voir l'effet des différentes attaques sur la forme d'onde. Cependant, cet affichage ne permet pas de faire une étude poussée. On comprend simplement, d'après ces formes, qu'il doit être très complexe de synthétiser fidèlement le son de la flûte à bec. En effet, pour s'approcher de l'instrument, le synthétiseur devrait pouvoir reproduire ces différentes attaques à différents moments. Ces formes sont en réalité extrêmement difficiles à

mettre en équation. Et quand bien même les scientifiques arriveraient à reproduire l'effet de chaque attaque, il faudrait alors envisager un clavier supplémentaire pour chacune d'elles ! Ce dispositif deviendrait extrêmement complexe à jouer et correspondrait encore à une approximation car un musicien ne fait jamais deux fois de suite exactement la même attaque. Dans l'exécution d'une œuvre, l'interprète réalise, en effet, des milliers de sons différents. Ces derniers n'ont jamais la même hauteur, le même spectre, ni les mêmes transitoires, qu'elles soient d'attaque ou d'extinction. Enfin, les sons n'auront pas la même forme, dans l'interprétation, suivant ce qui les suit et ce qui les précède. En fait, l'intérêt du jeu par ordinateur se trouve essentiellement dans la virtuosité. Un ordinateur, réalise sans difficulté un grand nombre de notes par seconde. Dans un mouvement lent, sont emploi peut être remis en cause.

CONCLUSION

Du modèle fonctionnel de la flûte à bec, nous retiendrons que le corps sonore est le siège d'ondes stationnaires périodiques, résultantes de l'addition d'ondes progressives incidentes et réfléchies. Sous l'effet de la surpression, dans certaines zones du corps de la flûte, l'air oscille tandis que dans d'autres points, l'air ne bouge pas. L'amplitude des oscillations varie de façon périodique. Si l'on ne change pas de doigté, les ventres de déplacement ainsi que les nœuds se situent toujours aux mêmes endroits du corps de la flûte, quel que soit le temps. C'est en déterminant l'espacement entre deux nœuds (ou ventres) que l'on détermine la longueur d'onde de l'onde stationnaire établie, et donc la note entendue.

Il convient de rappeler toutefois que cette étude sur le principe de fonctionnement de la flûte à bec n'a pas la prétention de refléter la réalité de tous les phénomènes mis en jeu lors de l'utilisation de l'instrument. Elle constitue simplement un « outil à penser » qui peut se révéler efficace si l'on éprouve le besoin d'interpréter des observations que tout musicien est amené à faire. Par exemple, ce modèle nous a servi dans la partie expérimentale de cette étude, lorsqu'il s'agissait d'expliquer les variations de timbre lors de l'exécution d'un doigté de fourche ou de comprendre les notions de registres.

L'analyse spectrale, à elle seule, nous a permis de mettre en évidence quelques caractéristiques souvent bien connues du son de la flûte à bec : pureté du timbre, influence des doigtés et de la forme de la cavité buccale sur le timbre etc. L'acoustique musicale générale peut se révéler utile lorsqu'un musicien ressent le besoin d'être conforté dans ses impressions. Nous avons vu à ce sujet, le cas du flûtiste Dan Laurin, qui s'est associé à des physiciens afin de prouver qu'une forme de cavité buccale avait des effets similaires sur le spectre de la voix et sur celui de la flûte à bec.

Malgré tout, si la recherche en acoustique est indispensable et profite souvent aux artistes, la rencontre entre physiciens et musiciens est parfois difficile. Le physicien fait, par exemple, souvent l'hypothèse de sons périodiques donc de durée infinie, ce qui paraît être une hérésie pour le musicien qui sait que la qualité d'un son dépend de sa durée, de son évolution, de la façon dont il est attaqué et coupé. Emile Leipp illustre très bien ce problème dans l'introduction de son ouvrage acoustique et musique : « La science manipule des grandeurs physiques bien définies et s'intéresse aux phénomènes précis, reproductibles ; mais l'art utilise des grandeurs psychologiques, floues par définition, puisque l'homme n'est pas normalisé, et s'intéresse à des phénomènes qui ne sont, en fait, jamais reproductibles en toute rigueur. Il semble donc que l'acoustique musicale implique des impératifs inconciliables : science exacte, ce n'est pas une science précise, et on comprend son discrédit auprès des scientifiques « purs » ». Ajoutons cependant, pour nuancer ce propos, que l'acoustique musicale est une science qui progresse constamment. Ces dernières décennies, grâce notamment aux progrès technologiques et au développement de l'électronique, l'acoustique s'est beaucoup développée. Elle se rend alors indispensable, rassure quelquefois le musicien en l'aidant dans la compréhension de son instrument, assiste les facteurs lors de leurs recherches sur des nouvelles sonorités ou des nouveaux matériaux... Enfin, part non négligeable, elle a apporté une nouvelle façon de transmettre des connaissances. En effet, même si la transmission du savoir de professeur à élève et de génération en génération est une chose magnifique et irremplaçable, la science permet aujourd'hui, grâce aux procédés d'enregistrement, de garder la trace des interprétations de tous les grands artistes. Qui n'a pas rêvé de pouvoir entendre, aujourd'hui, la quarantième symphonie de Mozart dirigée par lui-même ?

Le lien entre la science et la musique est donc complexe, mais la collaboration entre ces deux sphères est nécessaire, féconde et prometteuse.

ANNEXE 1²¹

Notion succinctes sur les gammes.

Les compositions musicales reposent sur des gammes définissant un ensemble de notes utilisables pour les compositeurs. Ainsi la gamme naturelle, issue de la culture occidentale, est bâtie sur 7 sons, elle a été étudiée par Pythagore, Zarlino, Ohm, Fourier, Helmholtz. On peut distinguer différents tempéraments, c'est-à-dire différentes répartitions des notes selon les époques, les compositeurs ou les instruments utilisés. Certains compositeurs contemporains utilisent d'autres gammes, notamment une gamme chromatique bâtie sur 12 notes (Schönberg, Webern, musique sérielle), d'autres utilisent des micro-intervalles...

On définit ces gammes à l'aide d'une fréquence de référence et par des rapports de fréquence par rapport à la référence.

Le principe fondateur pour construire la gamme naturelle est de rechercher les consonances entre différents sons. La théorie de Helmholtz²² considère que deux sons sont consonants si leurs spectres harmoniques ont des taux de recouvrements importants, c'est-à-dire si l'on retrouve beaucoup d'harmoniques communes dans les deux spectres. Ce taux de recouvrement des spectres dépend beaucoup du rapport des fréquences fondamentales. En effet, le spectre d'un son de fondamental f_1 contient en général les harmoniques $2f_1, 3f_1, 4f_1, \dots$. Si on considère deux sons de fondamentaux f_1 et $f_1' = 2f_1$, les harmoniques du son le plus aigu coïncident exactement avec les harmoniques paires du son le plus grave. Ces deux sons ont une bonne consonance, on considère que l'une est la transposée à l'octave de l'autre. Alors si le la₃ a pour fréquence fondamentale 440Hz, le la₄, à l'octave supérieure a pour fréquence fondamentale 880Hz et le la₂, à l'octave inférieure a pour fréquence fondamentale 220Hz.

Au contraire, le degré de consonance diminue lorsque le rapport numérique entre les fréquences fondamentales des deux sons devient plus complexe et, corrélativement, la sensation de présence de deux notes devient plus forte. C'est en particulier le cas des sons de fréquences fondamentales $3f_1$ et $5f_1$... qui tout en restant dans une certaine consonance, diffèrent suffisamment pour être considérés comme des notes musicales différentes. Ce sont précisément ces fréquences qui sont utilisées comme « définition » des notes dans la gamme de Zarlino. Ainsi l'accord parfait majeur est composé de trois sons de fondamentaux $f_1, 3f_1$ et $5f_1$. La note de fréquence f_1 étant dénommée la tonique, celle de fréquence $3f_1$, ramenée à l'octave en divisant par 2, $3f_1/2$ étant la dominante et celle de fréquence $5f_1$, ramenée à l'octave en divisant par 4, $5f_1/4$ représentant la médiante.

On ramène tous les intervalles à des rapports compris entre 1 et 2 pour que toutes ces notes soient regroupées entre la tonique et son octave.

On construit alors la gamme en plaçant les 3 notes formées par l'accord parfait majeur ramenées à l'octave. Puis la dominante est considérée comme la note de base d'un second accord parfait majeur, les notes étant ramenées à l'octave, on trouve les fréquences suivantes : $5/4 * 3f_1/2 = 15f_1/8$, $3/2 * 3f_1/2 = 9f_1/8$. Enfin la tonique du 1^{er} accord peut être considérée comme la dominante d'un nouvel accord parfait majeur, dont les fréquences, ramenées à l'octave sont $4f_1/3$ et $5f_1/3$.

La succession des notes ainsi engendrées constitue la gamme diatonique majeure de Zarlino. Placées dans l'ordre croissant, en prenant do comme note de base, on obtient la suite :

²¹ voir bibliographie [Beaufils, Grente] p1107

²² voir bibliographie [Jean Pierre Dalmond]

Notes	do	ré	mi	fa	sol	la	si	do
Fréquences	f_1	$9f_1/8$	$5f_1/4$	$4f_1/3$	$3f_1/2$	$5f_1/3$	$15f_1/8$	$2f_1$
Rapport à f_1	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2
	ton maj	ton min	1/2ton dia	ton maj	ton min	ton maj	1/2ton dia	

Les rapports de fréquences entre sons voisins permettent ensuite de définir les intervalles nommés ton majeur (9/8), ton mineur (10/9) et demi-ton majeur (ou diatonique) (16/15) auxquels pour compléter on peut ajouter un demi-ton mineur (ou chromatique) (25/24). On peut alors définir des notes intermédiaires en ajoutant dans les intervalles séparés par un ton les notes définies en ajoutant(#) ou en retirant (b) un demi-ton chromatique.

Changer l'ensemble des notes d'une œuvre en respectant les intervalles, c'est-à-dire transposer, revient à multiplier toutes les fréquences par un même nombre. Mais en procédant ainsi avec la gamme de Zarlino, on est conduit à introduire des sons nouveaux et donc à appeler du même nom des sons légèrement différents, cette incompatibilité entre les exigences des consonances et celle des transpositions conduit à des « compromis » consistant à accepter des consonances moins grandes pour autoriser davantage de modulations. On a donc élaboré de nombreux systèmes désignés sous le nom de tempéraments inégaux.

L'usage des claviers et des premiers instruments électroniques a notamment amené à définir la gamme à tempérament égal dans laquelle l'octave conserve sa définition initiale mais est divisé en douze demi-tons identiques. Le rapport des fréquences entre 2 notes espacées d'un tel demi ton étant $2^{1/12}$, et celui pour deux notes espacées d'un ton $2^{1/6}$.

On construit alors la gamme de do majeur en tempérament égal :

do	ré	mi	fa	sol	la	si
f_1	$2^{1/6}f_1$	$2^{1/3}f_1$	$2^{5/12}f_1$	$2^{7/12}f_1$	$2^{3/4}f_1$	$2^{11/12}f_1$

On rencontre évidemment de nombreux autres systèmes mais en s'appuyant sur la gamme à tempérament égal par exemple, on peut maintenant définir les notes par la fréquence de leur fondamental.

En choisissant comme référence le la3 à 440Hz, on obtient les « définitions » suivantes pour les différentes notes :

Note	Fréquence du fondamental en Hz
Do3	261,6
Ré	293,7
Mi	329,6
Fa	349,2
Sol	392,0
La3	440
Si	493,9
Do4	523,2
ré	587,3
Mi	659,3
Fa	698,5
Sol	784,0
La	880
Si	987,8

ANNEXE 2

Mesures d'intensité acoustique en dB.

L'intensité de l'onde se mesure par la puissance mécanique reçue par unité de surface, c'est-à-dire par l'énergie apportée par unité de temps et par unité de surface par la surpression. Plus la surpression est importante, plus la puissance acoustique reçue est grande. Les sons audibles ont une intensité acoustique comprise entre 10^{-12}W.m^{-2} (seuil d'audibilité) et 100W.m^{-2} (seuil de douleur).

Si on souhaite représenter sur un schéma la totalité des intensités acoustiques audibles, il faut être capable de représenter une échelle comportant 14 ordres de grandeurs différents. Il n'est pas envisageable d'obtenir une telle échelle linéaire. Par ailleurs si dans une salle contenant un haut-parleur en fonctionnement, on ajoute un second haut-parleur, la sensation auditive est peu modifiée. Lorsque l'on double l'intensité acoustique, l'oreille ne perçoit pas de différence très importante. Pour ces raisons, on a défini une nouvelle grandeur que l'on peut nommer niveau d'intensité acoustique L . En posant :

$$L = 10 \log I.$$

L est le niveau d'intensité acoustique exprimé de décibel (dB).

I est l'intensité acoustique exprimée en W.m^{-2}

La fonction \log représente le log décimal.

Avec cette définition, si l'intensité acoustique double $I_2=2.I_1$, on peut écrire :

$$L_2=10.\log I_2=10.\log (2.I_1)=10\log 2 + 10.\log I_1 = 3 + L_1 \text{ (en effet } \log(a.b)=\log a + \log b)$$

Le niveau sonore augmente de 3dB.

On utilise parfois une échelle en fixant une référence d'intensité. Par exemple en choisissant $L = 10\log(I/I_0)$. Alors l'intensité I_0 correspond à l'intensité de référence. Si $I=I_0$ alors $L=\log 1=0$, si $I<I_0$ alors $L<0$ et si $I>I_0$ alors $L>0$.

La sensation auditive n'est pas proportionnelle à l'intensité sonore mais au niveau d'intensité acoustique. C'est la raison pour laquelle on utilise dans la plupart des spectrogrammes l'échelle en dB.

Rappelons cependant que l'oreille humaine n'est sensible qu'aux sons de fréquences comprises entre 15Hz et 20kHz (cette plage diminuant avec l'âge), et de façon variable selon la fréquence, pour déterminer la sensation auditive réelle, il faut tenir compte de la sensibilité dans chaque zone de fréquence.

Pour déterminer le rapport des intensité acoustique connaissant la différences des niveaux d'intensité en dB, on peut s'appuyer sur le calcul suivant :

$$L_2-L_1=10\log (I_2)-10\log(I_1)=10\log(I_2/I_1)$$

$$\Leftrightarrow \log (I_2/I_1) = (L_2-L_1)/10$$

$$\Leftrightarrow I_2/I_1 = 10^{(L_2-L_1)/10}$$

Ainsi si dans un spectre, un pic se situe au niveau $L_1= -10\text{dB}$ et un second se situe au niveau $L_2=-16\text{dB}$, l'intensité acoustique I_1 est 4 fois supérieure I_2 (le calcul donne $I_2/I_1=10^{-0,6}=0,25\dots$)

Bibliographie :

Introduction

E.Leipp, *Acoustique et musique*, édition Masson et cie, Paris,1971.

Ondes acoustiques

H. Bouasse, *Instruments à vent Tome II*, librairie Delagrave, Paris, 1986.

R.J. Champeau, C.Delsart, *Cours de physique 1er cycle : Onde*, université Paris XI, 1995.

F.Gautier , « Matériau et instruments de musique à vent », in J. Renard et L.Espié(dir), *Revue des composites et matériaux avancés*. vol 10.n°3-2000., Hermes science publications.

P. Grécias, J.P Migeon , *Physique sup PCSI*, éditions Tec et doc, Paris, 1999.

Photo jet tuyau d'orgue

A. Hirschberg *et alii*, « Jet drive in a flue organ pipe », in *Modèle physiques création musicale et ordinateur vol 1*, Ed de la maison des sciences de l'homme.

Analyse harmonique

J.M. Brébec *et alii*, *Electronique Electrocinétique I*, édition Hachette supérieur, Paris, 1996.

Importance du fondamental

Michèle Castellengo, « La flûte à bec », *L'audiophile* n°4 édition Fréquences, 1972

Influence de la position de la bouche sur le timbre

J.P.Dalmond, J. Gilbert et J. Kergomard, « Des instruments à vents harmoniques » *Pour la science* n°238, Août 1997.

D. Laurin, “The relation between the vocal tract and recorder sound quality”, article publié sur le site internet: danlaurin.com/research.htm.

Notions sur les gammes

D. Beaufils, M.Grente, « A propos d'acoustique musicale : la question des gammes », *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°775, Juin 1995.