

**BONBOIRE Damien**  
**KASPRZACK Stanislas**  
**LE GALL Corentin**

Avec la collaboration de  
Fabrice Le Meignen et Philippe Kerhoze,  
enseignants de Sciences Physiques

François Gautier,  
enseignant-chercheur au LAUM

Patrick BOYRIE,  
facteur d'instruments à vent à Angers

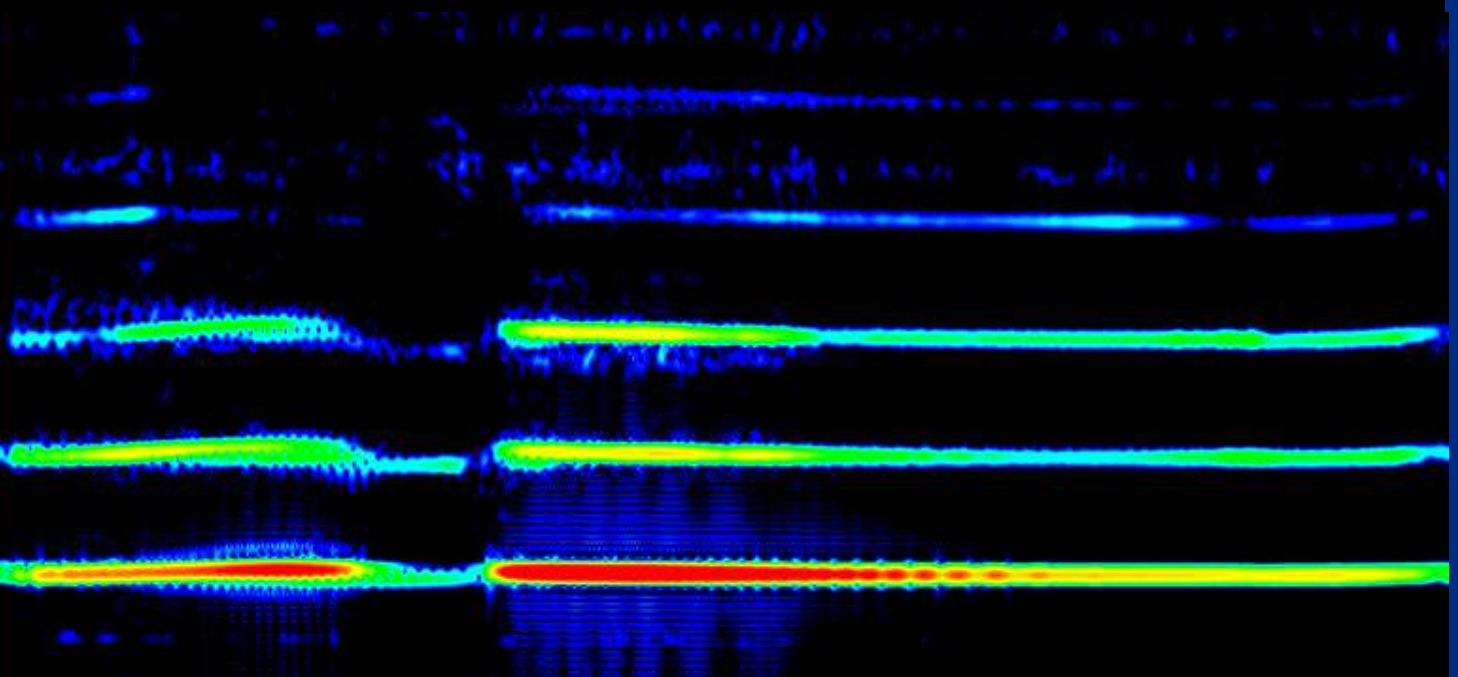
Concours 2013

Lycée Joachim du Bellay

Angers

# Mémoire d'Olympiades de Physique France

Le matériau de la paroi d'un instrument de  
musique à vent a-t-il une influence sur le son  
émis ?



# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b>	2
<b><u>I. ANALYSE SPECTRALE D'UNE FLUTE</u></b>	4
<b>A. DEMARCHE EXPERIMENTALE</b>	4
<b>B. OBSERVATIONS ET INTERPRETATIONS</b>	7
<b>C. REMISE EN QUESTION</b>	10
<b><u>II. MISE EN EVIDENCE DE SONS PATHOLOGIQUES AU MOYEN DE L'EXPERIENCE DE MILLER</u></b>	11
<b>A. DEMARCHE EXPERIMENTALE</b>	11
<b>B. PREMIERES OBSERVATIONS</b>	12
<b>C. HYPOTHESES</b>	14
<b><u>III. ANALYSE VIBRATOIRE DU TUYAU D'ORGUE ET REMISE EN QUESTION DE L'HYPOTHESE</u></b>	14
<b>A. INTRODUCTION DE LA VIBROACOUSTIQUE</b>	14
<b>B. DEMARCHE EXPERIMENTALE</b>	15
<b>C. OBSERVATIONS DES FREQUENCES MECANIQUES ET INTERPRETATIONS QUANT A LEURS RELATIONS AVEC LES FREQUENCES ACOUSTIQUES</b>	18
<b>CONCLUSION</b>	23
<b>ANNEXE I</b>	24
<b>ANNEXE II</b>	25
<b>REMERCIEMENTS</b>	26
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	27

# Introduction

Nous sommes tous les trois musiciens passionnés, dès lors, l'année passée, lorsqu'il nous fallut réaliser nos Travaux Personnels Encadrés nous nous sommes tout de suite intéressés au domaine de la musique. En tant qu'instrumentistes, nous avons alors voulu mettre en évidence l'influence, s'il y en a une, du matériau de la paroi sur le son émis par un instrument de musique à vent. Poursuivant dans le cadre des Olympiades de Physique, nous vous proposons ainsi de découvrir plus amplement ce qu'il en est par nos travaux, réalisés en collaboration avec François Gautier, enseignant-chercheur en vibroacoustique au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM). Alors que généralement nous ne concevons que la partie acoustique d'un instrument, vous pourrez en découvrir ici la partie vibratoire. Son influence depuis de très nombreuses années est source de débats entre acousticiens, facteurs d'instruments, et musiciens. Nous allons ici mettre en évidence son importance.

- Le son est une onde progressive se propageant dans un milieu. Il correspond à une variation de pression avec le temps. Cette variation peut être sinusoïdale (dans le cas du son émis par un diapason par exemple) ou complexe (dans le cas d'instruments de musique) qui est une perturbation se propageant de proche en proche dans l'air par une série de surpressions et de dépressions. Le son émis par les instruments de musique notamment à vent est un son complexe. Le spectre d'un tel son comprend des composantes harmoniques induites par le phénomène d'auto oscillation et un spectre de bruit lié au bruit de jet. Le caractère harmonique des raies observées est la conséquence directe de la périodicité du phénomène. Parmi ces composantes harmoniques, nous distinguons la fréquence fondamentale  $f_1$ , déterminant la hauteur du son, et de fréquences harmoniques de rang  $n$ , dont les fréquences,  $f_n = n \times f_1$ ,  $n$  entier naturel, et dont le nombre et l'intensité font varier le timbre. Le spectre de bruit qui se superpose présente une certaine coloration : des maxima locaux peuvent être observés aux fréquences de résonance du conduit. Ces résonances sont légèrement inharmoniques et se distinguent donc des composantes harmoniques. Ces inharmonicités sont caractérisées par des fréquences dites inharmoniques ne répondant donc pas à la multiplicité par rapport à la fondamentale (cf. Fig.1).

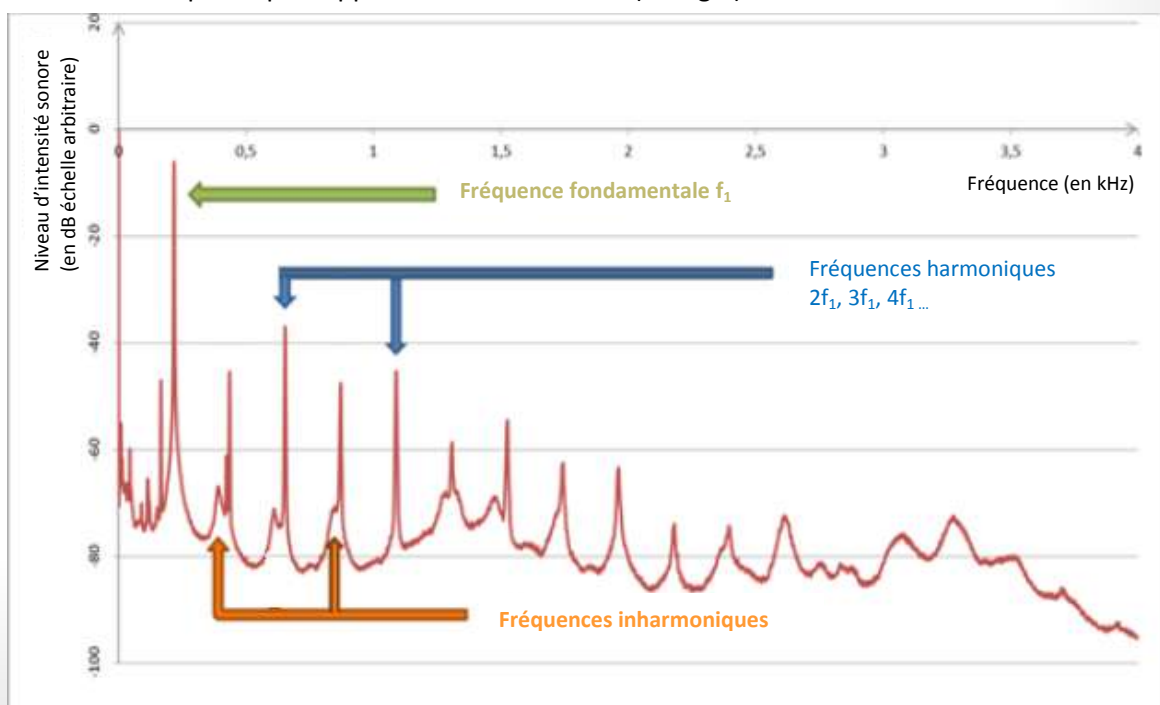


Figure 1 : Spectre d'un son complexe

- Nous allons donc étudier l'influence de la vibration de la paroi dans le cas des instruments de musique à vent et notamment les bois. Un instrument de musique à vent est constitué d'un système excitateur tel qu'un biseau ou une anche pour un instrument de la famille des bois, qui vient mettre en vibration une colonne d'air délimitée par un tuyau. La colonne d'air en vibration transmet ses vibrations au milieu extérieur par les ouvertures dans le tuyau, telles que le pavillon pour un instrument cuivre. Le milieu extérieur, le plus souvent l'air ambiant, transmet ensuite ces vibrations jusqu'aux oreilles de l'auditeur.

Selon les solutions de l'équation de d'Alembert, vérifiée par la pression acoustique à l'intérieur de l'instrument, nous pouvons savoir que le champ sonore, l'onde produite dans le conduit d'un instrument ou le long d'une corde (de guitare par exemple) est la superposition de deux ondes progressives se propageant dans des directions opposées. De ce fait, cette superposition donne lieu à une onde stationnaire : il ne s'agit plus réellement une onde mais seulement une vibration dont l'amplitude dépend de la position du point considéré. Cette onde est caractérisée par des phénomènes d'interférences constructives et destructives, donnant lieu à la présence de nœuds et de ventres.

De ce fait, à certains points sur la corde ou dans le conduit, il y a interférence destructive, soit un nœud de vibration en ce point et donc un ventre de pression dans le tuyau sonore. A l'inverse, il peut y avoir interférence constructive entre l'onde progressive et l'onde régressive à certains points qui vibrent alors beaucoup donnant lieu à un ventre de vibrations soit un nœud de pression.

Toujours grâce aux solutions de l'équation de d'Alembert, nous pouvons déduire la localisation de ces nœuds et ventres de pression et de vibrations dans un tuyau sonore ouvert des deux côtés (biseau et lumière à l'extrémité) tel que pour l'harmonique de rang  $n$  notée  $f_n$ ,  $f_n = n * \frac{c}{2L}$ . Pour  $n$  le nombre de fuseaux (la distance entre deux nœuds ou deux ventres),  $C$  la célérité de l'onde et  $L$  la longueur du conduit.

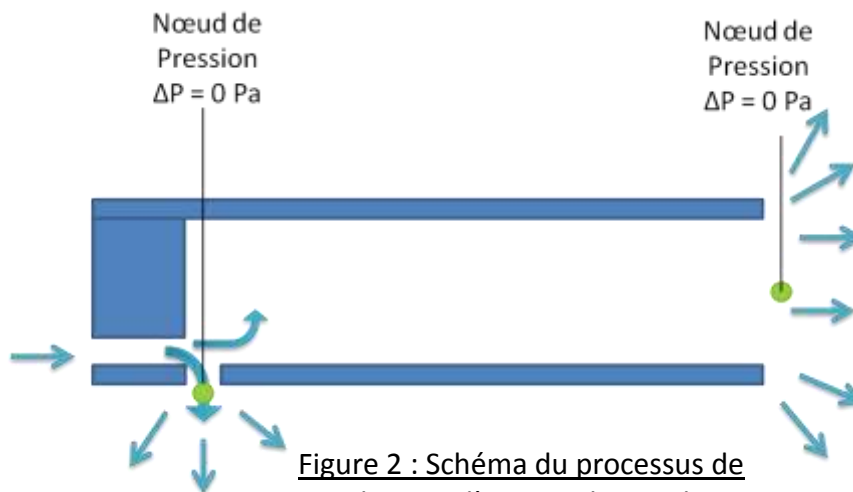


Figure 2 : Schéma du processus de production d'un son chez un bois

Cependant, l'onde interne étant stationnaire, nous ne devrions rien entendre du fait de la présence d'un nœud de pression à la lumière du conduit et du biseau. Le son émis est en réalité dû au fait que la pression au niveau des nœuds externes soit très légèrement différent de 0. Les nœuds de pression sont en fait légèrement décalés par rapport à ce que prévoit le modèle (cf. Fig.2). Cela met en évidence le fait que le son que nous entendons n'est qu'une "fuite".

# I. Analyse spectrale d'une flûte

## A. Démarche expérimentale

Afin de mettre en évidence l'influence du matériau sur le son émis par un instrument de musique à vent, nous avons d'abord étudié le cas de flûtes à bec dont les essences de bois, dans laquelle elles sont fabriquées, sont différentes. Pour cela, nous avons fabriqué quatre tubes identiques en ébène, buis, pin, et érable que nous avons adapté successivement à un bec de flûte en plastique. Nous faisons sonner alors les flûtes grâce à un système d'excitation, une soufflerie sur la base d'un compresseur.

Nous avons ainsi effectué une série de vingt enregistrements (afin d'estimer l'incertitude de répétabilité des mesures) pour chaque tube de bois utilisé en réalisant leurs spectres, afin de déterminer l'influence du paramètre variant, l'essence de bois de la paroi, sur le son émis par la flûte.

- Les tubes de bois

Soucieux de garder le lien avec la musique dans cette démarche, nous cherchâmes à connaître le bois particulièrement utilisé dans la facture instrumentale.

Pour cela, nous avons pris contact avec Monsieur Boyrie, facteur d'instrument à vent à Angers à la boutique « Opus 49 » (cf. Fig.3).

Cela nous a permis de découvrir un peu de l'histoire de ce métier et l'évolution des pratiques.

En effet, les différentes essences de bois étant plus ou moins sensibles aux conditions extérieures, certaines se fendent plus facilement que d'autres, ce qui est le facteur principal au changement d'essence pour les instruments à vent de la famille des bois : au début c'est le buis qui était le plus utilisé car le plus « résistant », puis l'ébène.

Ainsi, notre liste était la suivante: l'ébène, le buis, des essences encore très utilisées en facture instrumentale, et l'érable et le pin, des essences moins utilisées mais très différentes des deux précédentes.

Pour déterminer les cotes (cf. Fig.4) et tourner nos conduits en bois, nous avons alors pris contact avec un ébéniste, Monsieur Fasilieu, ayant déjà contribué à un projet Olympiades de Physique France : la boule de fort, présenté en 2010.



Figure 3 : Rencontre avec Monsieur Boyrie



Figure 4 : Cotes et vue tridimensionnelle du conduit

- La soufflerie

Afin d'émettre un son dans des conditions identiques lorsque nous faisons varier le paramètre essence de la paroi, il nous fallait trouver un système de soufflerie à débit et pression constants. Après avoir réalisé plusieurs montages soit trop bruyants soit inefficaces, nous avons mis en place un système de soufflerie constitué d'un compresseur à air de débit constant (grâce à un manomètre mesurant la pression en cuve et un régulateur de pression) relié à un pistolet de gonflage avec manomètre adapté grâce à un dispositif reposant sur une chambre à air. (cf. Fig. 5 et 6)



Figure 5 : Montage du second système de soufflerie avec compresseur

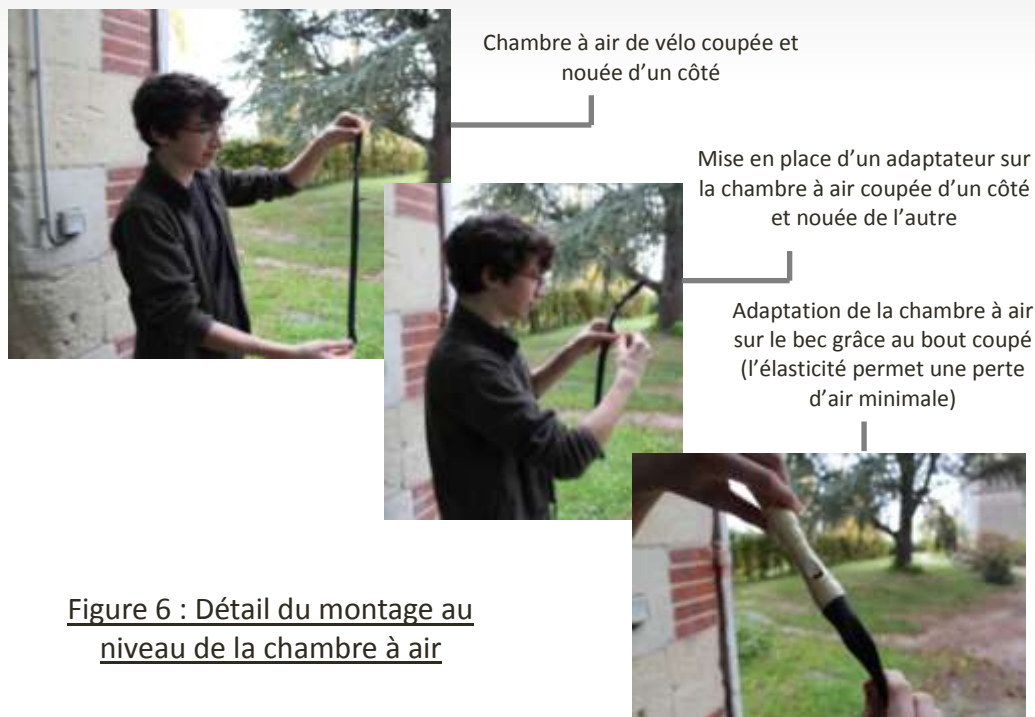


Figure 6 : Détail du montage au niveau de la chambre à air

Nous avons ainsi pu dresser le protocole final :

#### Matériel :

- un compresseur;
- un pistolet de gonflage avec manomètre;
- un système d'adaptation par chambre à air (voir précédemment);
- un bec standard de flûte à bec;
- quatre tubes d'essences de bois différentes: ébène, buis, érable, pin;
- un microphone standard avec adaptateur pour entrée jack;
- un ordinateur portable doté d'un logiciel de traitement du son (ici « Audacity »).

#### Protocole :

Actionner le remplissage en air du compresseur.

Connecter le microphone à l'ordinateur. Adapter un tube de bois sur le bec relié grâce au dispositif de chambre à air au pistolet de gonflage relié lui-même au compresseur préalablement rempli.

Appuyer sur le pistolet de gonflage à une pression précise de telle sorte que le son soit régulier et que la fréquence fondamentale soit, le plus possible, la même pendant toute l'expérience.

Une fois l'enregistrement fait, tracer le spectre correspondant (sa qualité dépend alors de la régularité du son enregistré).

Faire de même pour les autres tubes d'essences de bois différentes puis comparer les résultats obtenus.

Schéma du montage : (cf. Fig. 7)

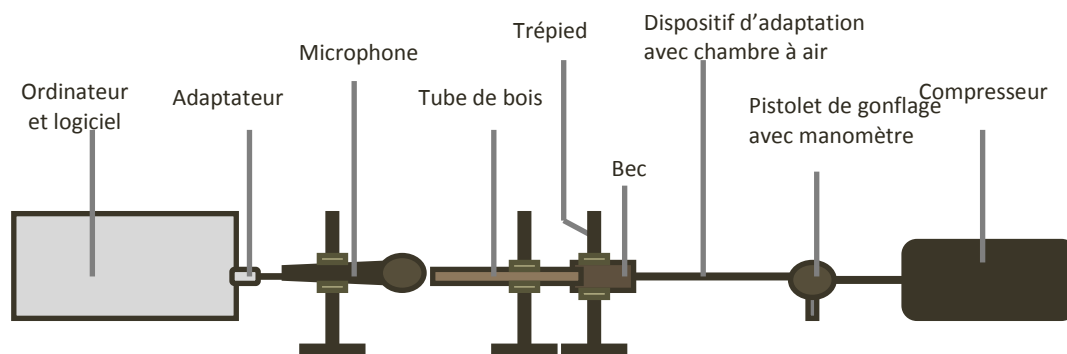


Figure 7 : Schéma du montage

## B. Observations et interprétations

Pour analyser le son produit par nos flûtes, nous avons enregistré le son émis par celles-ci à l'aide d'un logiciel d'acquisition, Audacity. Ce logiciel réalise une analyse spectrale en utilisant la transformée rapide de Fourier qui permet d'obtenir le spectre d'un son enregistré.

Nous avons répété ces enregistrements vingt fois pour chaque essence de bois. La répétition des acquisitions nous a permis d'obtenir une moyenne, ainsi qu'une incertitude de répétabilité. Nous avons ensuite obtenu des graphiques qui nous ont permis de comparer le spectre des sons émis. Nous avons d'abord commencé par superposer les spectres des moyennes, et nous avons obtenu ce graphique (cf. Fig. 8) :

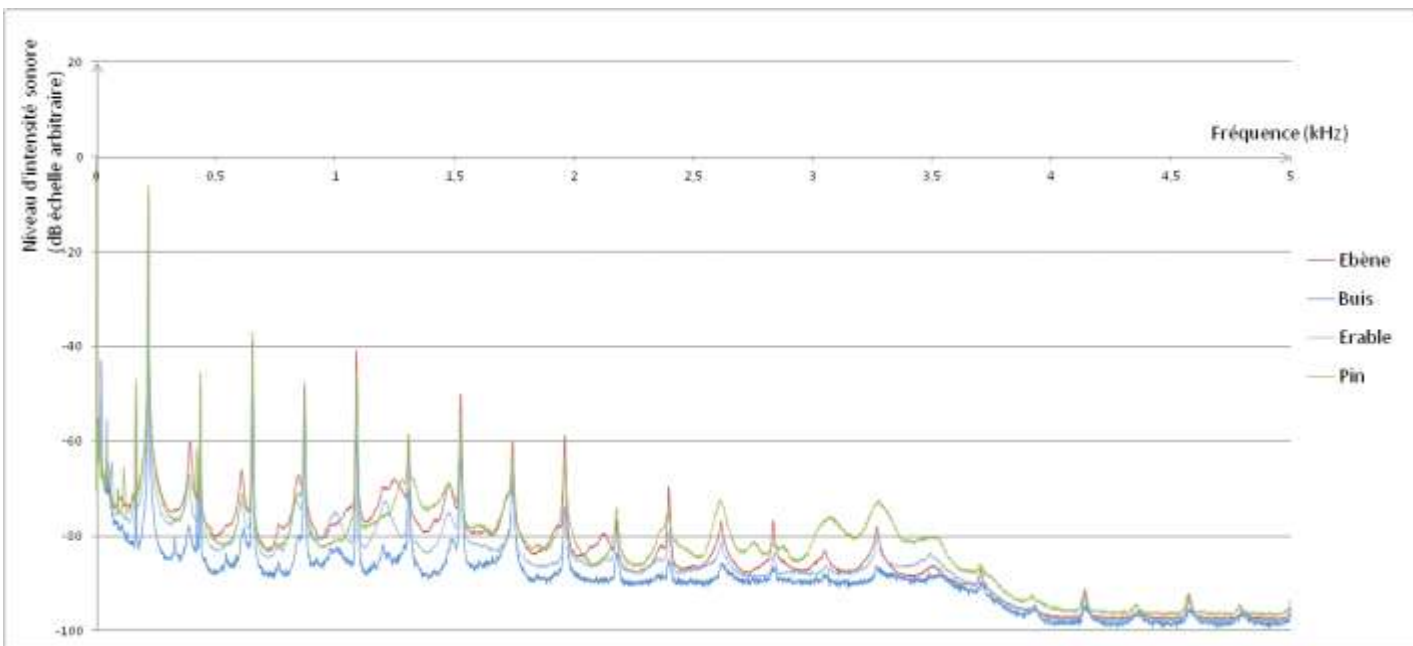


Figure 8 : Comparaison des moyennes des enregistrements pour chaque essence de bois



Ce graphique affiche le niveau d'intensité sonore relatif en dB en fonction de la fréquence. Nous pouvons observer des différences au niveau des harmoniques, mais elles sont difficilement visualisables, et nous ne pouvons pas voir si les différences de niveau d'intensité sonore sont supérieures aux incertitudes de répétabilité calculées précédemment.

Pour répondre à ces interrogations et déterminer si les différences entre les spectres étaient significatives, nous avons repéré graphiquement les principales harmoniques de chaque essence, associées à leur intensité sonore et leur incertitude  $U$ . Nous avons ensuite voulu savoir si les écarts d'intensité sonore entre deux essences au niveau des harmoniques étaient supérieurs ou non à l'une ou l'autre des incertitudes associées. Les résultats de ce test sont affichés ici dans le graphique ci-après (cf. Fig.9). Nous avons considéré que lorsque la différence d'intensité n'était supérieure à aucune des incertitudes associées, les résultats n'étaient pas probants ; lorsque la différence d'intensité était supérieure à une seule des incertitudes associées, les résultats étaient peu probants. Nous avons considéré qu'ils l'étaient lorsqu'ils étaient supérieurs aux deux incertitudes associées.

Pourcentage du nombre de valeurs fiables par rapport au nombre total de valeurs

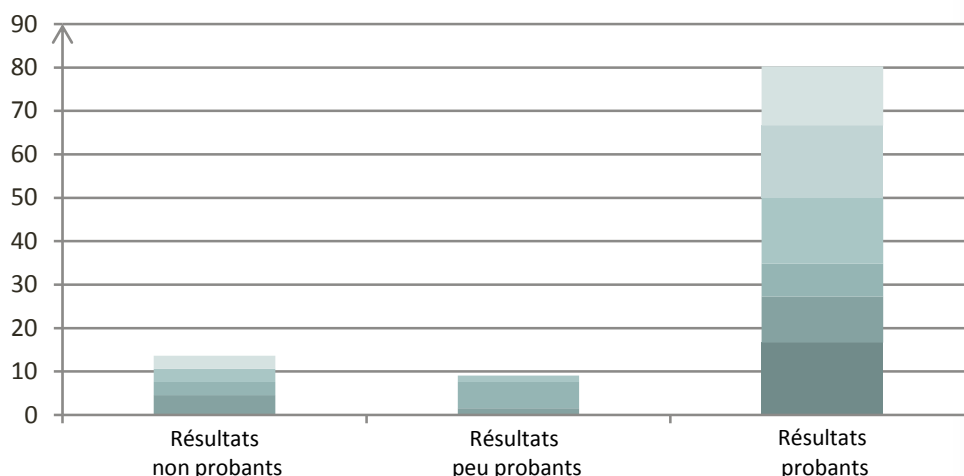


Figure 9 : Tableau des résultats obtenus

On voit que, pour 80% des harmoniques relevées, soit plus de la majorité, les écarts d'intensité sonore entre deux essences au niveau des harmoniques sont supérieurs aux deux incertitudes associées. Donc, les spectres obtenus sont vraiment différents, et donc le son produit par les différents conduits est réellement différent.

La comparaison des différences nous permet de classer les sons produits par les flûtes. Un son dont les harmoniques sont plus intenses sera considéré comme plus clair qu'un son dont les harmoniques sont plus faibles. En traçant les harmoniques étudiées en fonction de leur intensité, on obtient le graphique suivant (cf. Fig.10):

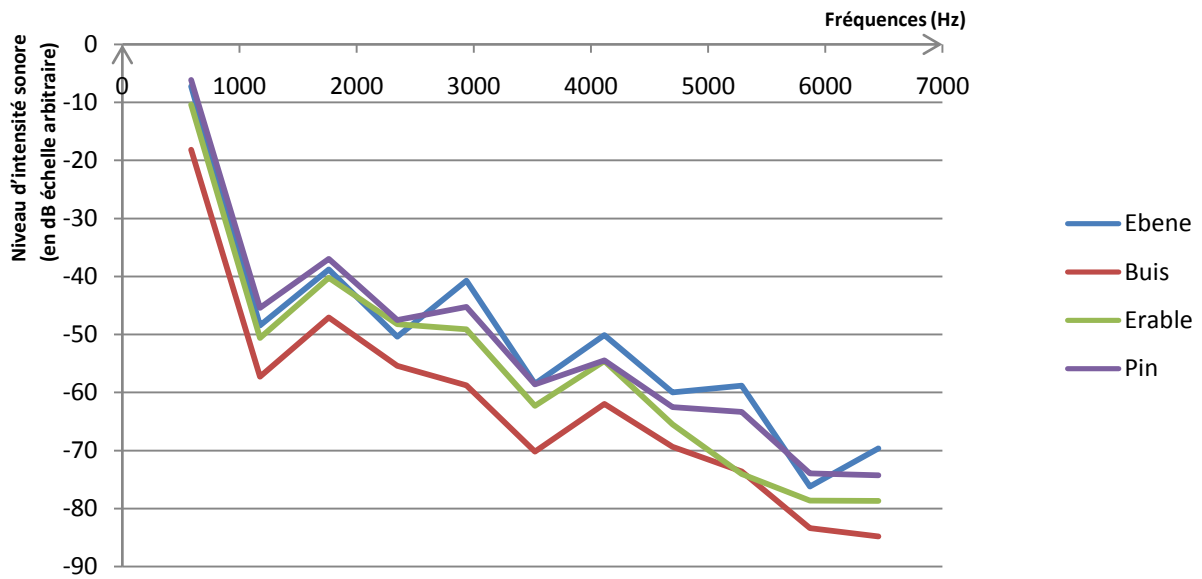


Figure 10 : Tableau comparatif des spectres obtenus

On note clairement que les harmoniques du buis sont inférieures à celles de l'ébène, qui sont elles-mêmes inférieures à celles de l'érable et du pin. Le spectre de l'ébène a des harmoniques supérieures à celles du pin pour six harmoniques sur onze relevées, donc on peut dire que le son produit par la flûte en ébène a un son plus clair. On peut ainsi classer le son produit par les flûtes du plus clair au moins clair : Ebène, Pin, Erable, Buis.

Cependant, nous avons remarqué que le volume sonore des enregistrements peut varier, et donc l'intensité des spectres associés varie aussi. Ces différences sont peut-être dues aux différences de niveau sonore entre les tubes et non pas à des différences de timbre. Il nous sembla alors nécessaire d'égaliser ces sons et donc leurs spectres. Pour ce faire, nous avons égalisé toutes les harmoniques de plus haut niveau d'intensité sonore chez chaque son (ici toujours la fondamentale) au même niveau d'intensité sonore. Cela a ainsi décalé tous les spectres de telle sorte que ces fréquences soit de même intensité. De ce fait, nous avons alors pu comparer les spectres en considérant les niveaux d'intensité sonore (de chaque harmonique) relatifs au maximum d'intensité pour chaque spectre.

Ci-dessous (cf. Fig.11), nous avons dressé le tableau comparatif des spectres avec les principales harmoniques (les mêmes que celles étudiés dans le dernier graphique).

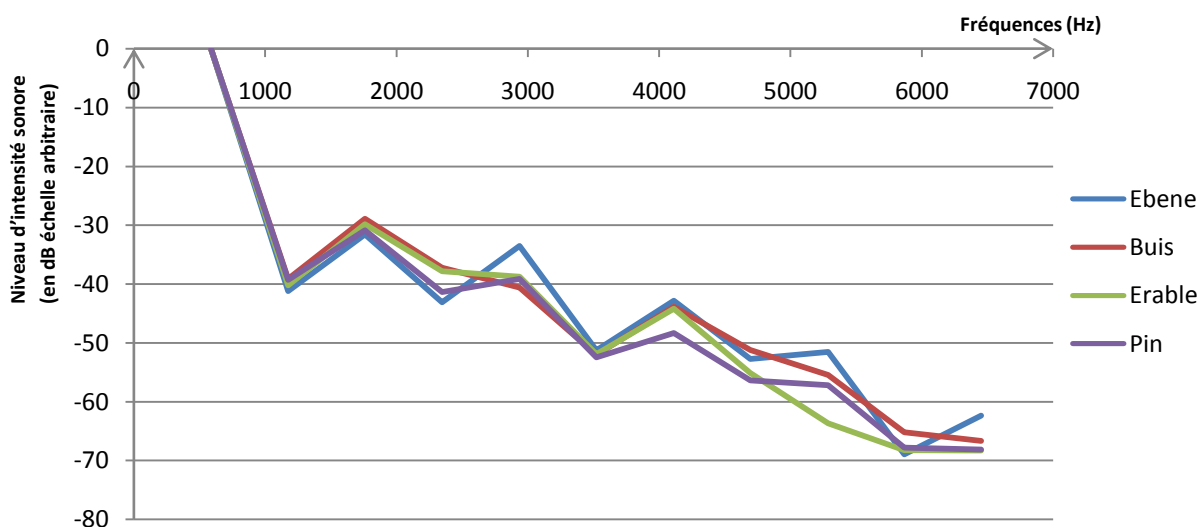


Figure 11 : Tableau comparatif des spectres obtenus après égalisation

Nous pouvons donc observer que les différences observées dans un premier temps, après égalisation des spectres, ne sont finalement pas si évidentes. Ces différences sont certainement dues aux conditions d'excitation.

De plus, nous avons alors de nouveau estimé les différences entre les spectres en comparant nos résultats aux incertitudes (cf. Fig.12). (le détail de ce traitement se trouve en annexe 1)

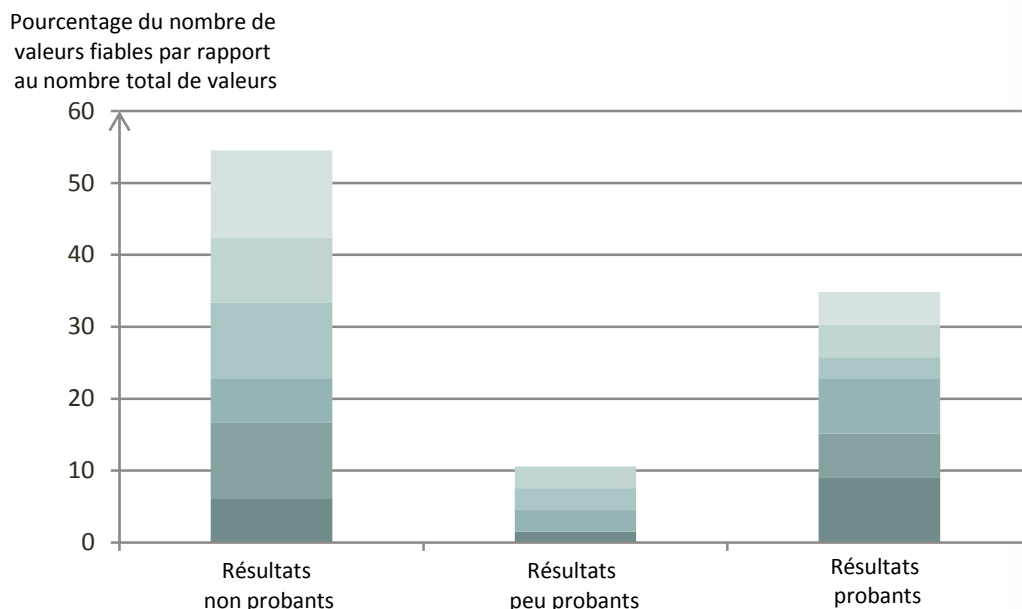


Figure 12 : Tableau des résultats obtenus après égalisation

Nous pouvons donc ici voir que plus de 65% des résultats ne sont pas ou peu probants, après égalisation. Ce qui signifie que la majorité des différences entre les spectres pourrait être inversée. Il nous est donc impossible d'établir une classification ou une quelconque influence des vibrations la paroi et, de surcroît, de son matériau sur le son émis, pour de tels instruments (de telles dimensions).

### C. Remise en question

Alors que, avant ces travaux, c'est-à-dire en mars 2012 lors de notre présentation en TPE, nous étions convaincus que l'ébène avait des qualités harmoniques supérieures aux autres bois. Dans le cadre des olympiades nous avons rencontré François Gautier, enseignant-chercheur en vibroacoustique au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (au Mans), qui nous a fait comprendre l'origine de l'incertitude de nos résultats. En effet, son verdict était sans appel : des paramètres tels que l'arrivée d'air et la proximité du micro par rapport à l'extrémité de la flûte ont une influence largement supérieure à la vibration de la paroi, correspondant au timbre ou à la



Figure 13 : Rencontre avec Monsieur Gautier

hauteur, sur le son émis. D'autres paramètres tels que l'imperfection de la géométrie du conduit, la rugosité de la surface interne du tube et les variations de la pression sortant du compresseur ont également une influence considérable sur le son émis. Selon ses termes, chercher l'influence de la vibration de la paroi avec cette expérience était comme « mesurer le nanomètre avec un double décimètre ».

## II- Mise en évidence de sons pathologiques au moyen de l'expérience de Miller

### A. Démarche expérimentale

Cependant, afin de mettre en évidence l'influence de la paroi sur le son émis, nous est venue l'idée de réaliser l'expérience de Miller. Dayton Miller est l'un des membres fondateurs de la société américaine d'acoustique. Il publiait en 1909 une étude expérimentale dans laquelle il comparait des tuyaux d'orgue, à embouchure de flûte et de section rectangulaire, d'épaisseurs et de matériaux différents (bois, zinc). Dans l'une de ses expériences, Miller remplissait d'eau l'espace compris entre la double coque d'un tuyau d'orgue en zinc, permettant ainsi d'en immobiliser, en une certaine mesure, les parois. Il observait sans l'expliquer que certains niveaux de remplissage de la cuve périphérique donnent lieu à des comportements atypiques, clairement audibles, notamment des changements de hauteur et des sons qui « roulent », c'est-à-dire non tenus et instables au cours du temps. Cette expérience met évidence l'influence de la paroi et du matériau sur le son émis. Tous les paramètres sauf un restent inchangés permettant ainsi de mettre en évidence la seule vibration de la paroi. De plus, dans la reproduction de l'expérience que nous avons réalisée, le système de soufflerie a été amélioré avec l'installation d'un bidon permettant de canaliser et de tempérer le flux d'air arrivant au niveau du biseau du tuyau d'orgue. Ce dernier chante alors et seul le niveau de l'eau qui est autour de la paroi varie alors que nous enregistrons le son émis. La paroi étant fine et métallique, et le tuyau étant de dimensions importantes, le phénomène est alors observable.

#### Matériel :

- un tuyau d'orgue entouré d'une double coque
- un compresseur à air
- un bidon de 50L
- un bidon de vidange
- un robinet permettant un écoulement régulier de l'eau
- 3 litres d'eau

#### Protocole :

Remplir le compresseur d'air.

Remplir la double coque d'eau.

Ouvrir le robinet du compresseur à air jusqu'à l'obtention du son voulu.

Lancer l'enregistrement.

Ouvrir le robinet afin de débiter la vidange.

Schéma du montage : (cf. Fig.14)

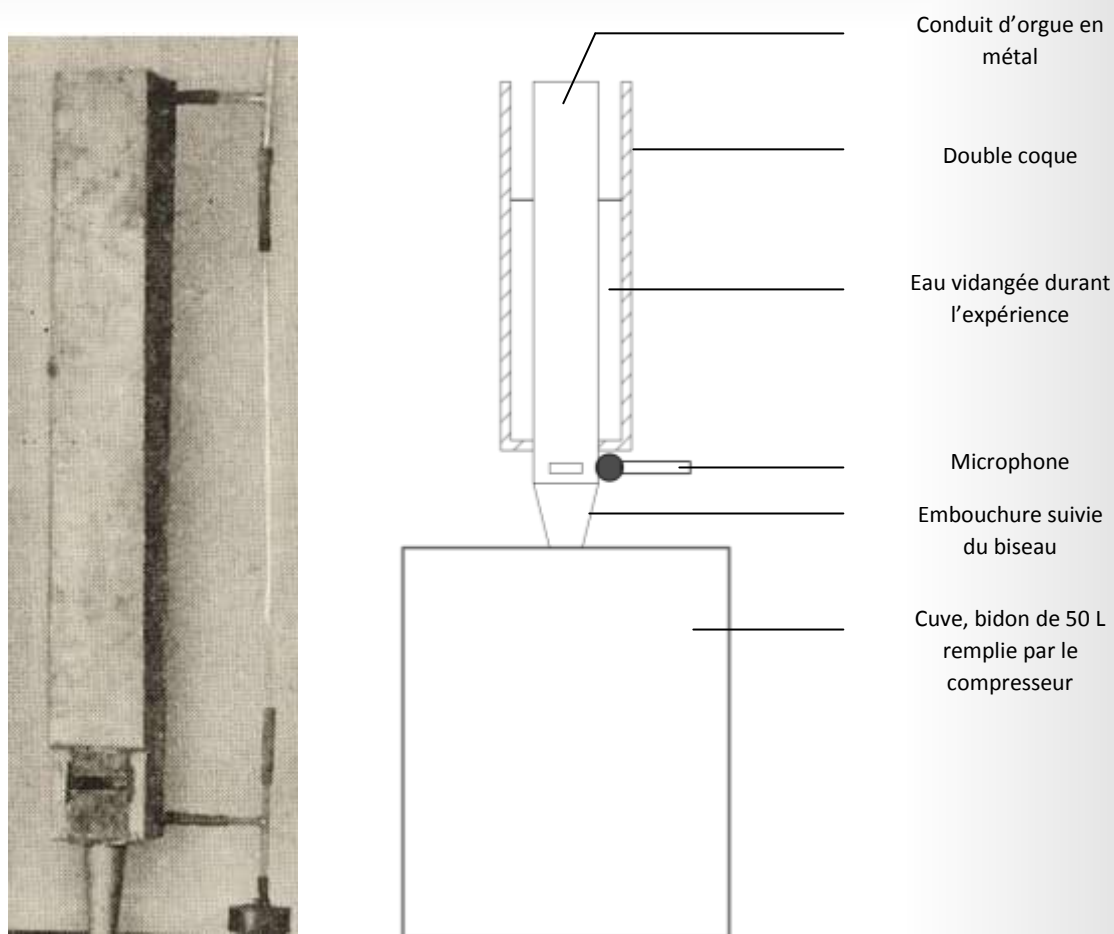


Figure 14 : Schéma de montage et photographie de l'expérience historique de Miller

## B. Premières observations

On observe que pour certaines hauteurs de la colonne d'eau, on entend des notes qui changent de hauteur, des notes qui roulent, et des interruptions de son. L'enregistrement du son produit par le tuyau d'orgue nous permet d'afficher son spectrogramme. Le spectrogramme affiche sur l'axe horizontal le temps, et sur l'axe vertical la fréquence. A chaque point du graphique est attribuée une certaine intensité qui indique l'amplitude d'une fréquence particulière à un temps donné.

Ici, et afin de vérifier que les niveaux d'eau auxquels des sons pathologiques étaient audibles, nous avons relevé par analyse vidéo ces niveaux. Ainsi, sur cinq vidéos nous les avons déterminés en estimant les incertitudes liées.

Nous avons alors obtenu le tableau en annexe 2. Sur ce tableau, nous pouvons voir que les sons pathologiques concernent majoritairement les mêmes niveaux d'eau à chaque fois. Le phénomène est donc régulier et directement lié au niveau d'eau.

Il nous parut alors pertinent d'afficher en abscisse sur le spectrogramme le niveau d'eau (cf. Fig. 15). Voici donc ce que nous avons obtenu pour l'expérience de Miller :

Fréquences (Hz)

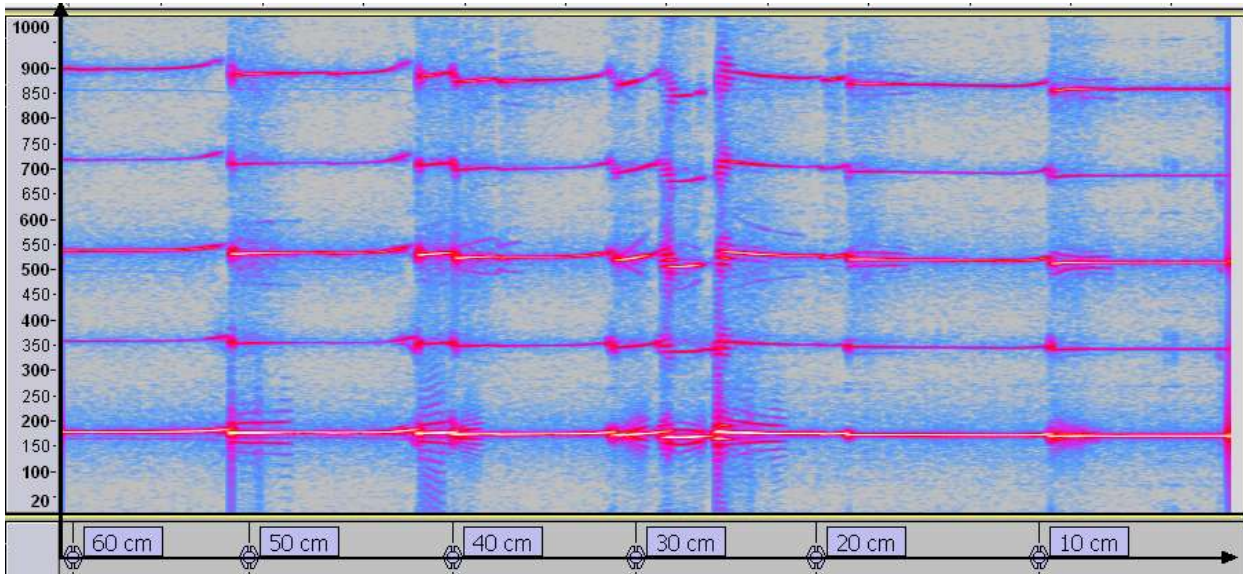
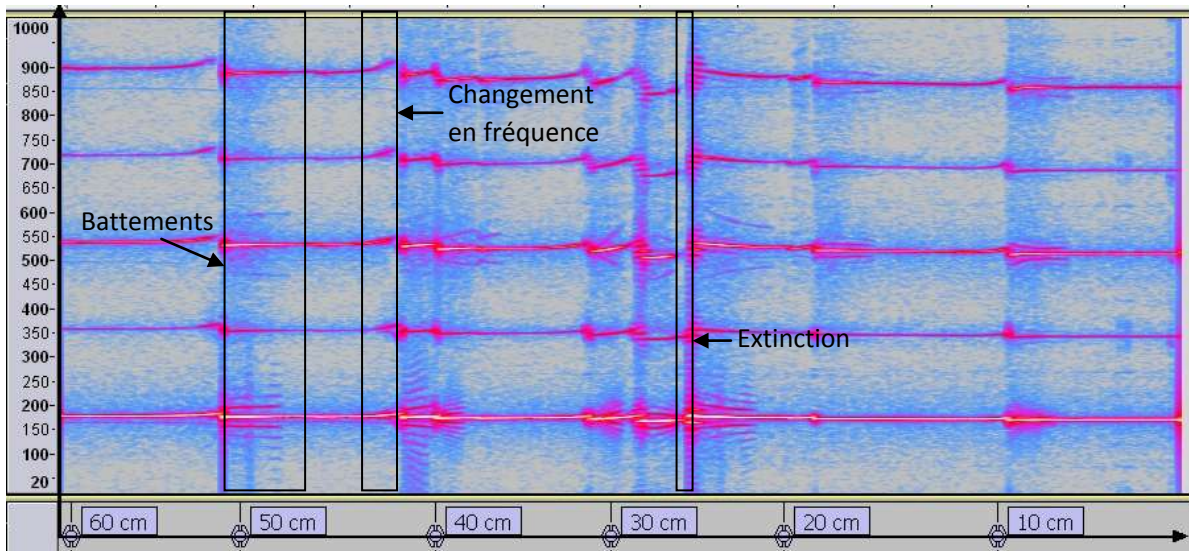


Figure 15 : Spectrogramme du son enregistré  
provenant de l'expérience de Miller

Niveau d'eau (cm)

Ce spectrogramme nous permet de repérer trois types de perturbations, que l'on nommera des sons pathologiques. On observe ainsi des changements de hauteur de la note produite par le tuyau d'orgue, des interruptions du son, et des « notes qui roulent », c'est-à-dire des battements. (cf. Fig.16)

Fréquences (Hz)



Niveau d'eau (cm)

Figure 16 : Spectrogramme du son enregistré provenant de  
l'expérience de Miller

On observe que les notes qui roulent correspondent à des battements dus à l'apparition de fréquences proches de celles déjà existantes.

## C. Hypothèses

Nous avons ainsi pu observer l'apparition de sons pathologiques lors de la vidange en eau. Ne faisant varier qu'un paramètre lié à la paroi, nous avons ainsi mis en évidence son influence sur le son émis par l'instrument à vent de la famille des bois, ici le tuyau d'orgue.

Nous avons alors émis l'hypothèse suivante quant à leur apparition :

Lorsque nous vidons la cuve en eau, c'est en réalité la pression sur le tube de métal que nous modifions, et par cela sa capacité à entrer en vibration. Nous avons supposé alors que nous changions ces modes de résonances mécaniques faisant, selon ce que nous pensions, diminuer les fréquences d'excitation pour lesquelles la paroi entrait en résonance avec une réponse importante.

Or, les modes mécaniques sont des caractéristiques intrinsèques de la structure. Ils dépendent de la géométrie, du matériau, des conditions aux limites appliquées. Lorsque le niveau d'eau est changé, ces modes sont modifiés. Les fréquences et les déformées modales sont donc fonction du niveau d'eau. Changer le niveau d'eau revient donc à changer les fréquences de résonance mécanique de la structure. Les modes mécaniques étant une des caractéristiques intrinsèques qui varie selon le matériau, nous pouvons alors considérer que modifier le niveau d'eau, donc les modes mécaniques, revient à changer fictivement le matériau de la paroi. De ce fait, nous avons mis, dans cette expérimentation, en évidence l'influence de la vibration du matériau de la paroi sur le son émis par un instrument à vent de dimension semblables à celles du tuyau d'orgue étudié.

Il nous restait donc alors à mesurer, expliquer ce phénomène en essayant de comprendre le comportement des modes mécaniques par rapport au son entendu lors de la vidange en eau pendant l'expérience de Miller.

## III- Analyse vibratoire du tuyau d'orgue et remise en question de l'hypothèse

### A. Introduction à la vibroacoustique

La vibroacoustique (encore appelée acoustique des structures) étudie les ondes mécaniques dans les structures, comme ici les conduits, et comment celles-ci interagissent et rayonnent dans le fluide environnant, ici la colonne d'air interne et l'air ambiant. Cette science permet d'observer les couplages vibroacoustiques entre fluide et solide. Il en existe de trois ordres : le couplage interne, externe et excitateur. (cf. Fig.17) Dans le cas de l'expérience de Miller, elle permet de mettre en évidence le couplage vibroacoustique interne entre les modes mécanique dus aux vibrations de la paroi, qui varient en fonction du niveau d'eau (soit du matériau fictif de la paroi), et les ondes acoustiques de la colonne qui restent inchangées (hors cas de sons pathologiques).

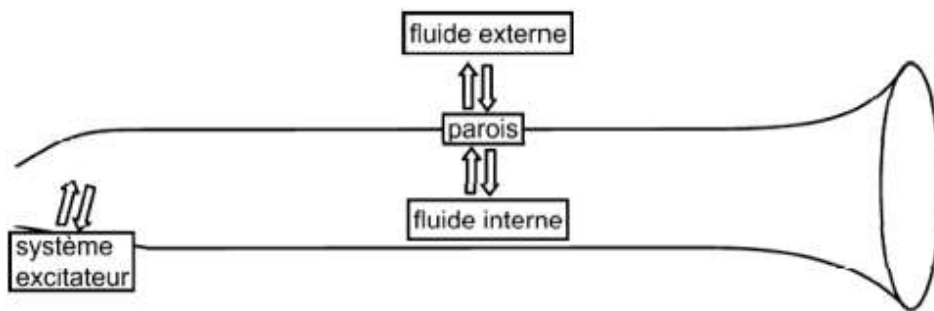


Figure 17 : Schéma mettant en évidence les différents couplages mis en jeu dans chez un instrument à vent

## B. Démarche expérimentale

Comme avec un microphone, nous avons voulu enregistrer les vibrations de la paroi lors de la vidange en eau afin de déterminer les fréquences mécaniques en fonction du niveau d'eau lors de l'expérience. Nous voulions savoir s'il y aurait coïncidence fréquentielle pour les niveaux d'eau où l'on entend des sons pathologiques.

L'établissement de la bonne démarche notamment quant à la mise en œuvre de l'accéléromètre prêté par monsieur Gautier a été longue et s'est faite après plusieurs essais (2 jours de travail pendant les vacances de Noël !):

- Tout d'abord, nous avons cherché à imposer une fréquence de vibration au tuyau, en faisant varier le niveau d'eau. Nous avons pour cela utilisé un pot vibrant fabriqué par nos soins avec un haut parleur et un GBF, qui impose au tuyau une fréquence pure, donc sinusoïdale. En faisant varier le niveau d'eau alors que la vibration imposée par le pot vibrant est toujours identique, on observe des différences dans la vibration du tuyau.

### Matériel :

- identiques à celui utilisé lors de la précédente expérience sur le montage de Miller ;
- un accéléromètre et son boîtier transformateur ;
- un adaptateur pour entrée microphone d'ordinateur ;
- un haut parleur avec une tige métallique fixée sur sa membrane ;
- un Générateur Basse Fréquence.

### Protocole :

Fixer l'accéléromètre sur la paroi du tuyau d'orgue dont la cuve périphérique est pleine en eau. Nous avons utilisé un accéléromètre Piezotronics, PCB 333A32.

Vérifier que l'accéléromètre soit relié à son boîtier transformateur alimenté en électricité. Relier le boîtier de l'accéléromètre à un module connecté à l'ordinateur permettant à ce dernier de le détecter en tant qu'entrée microphone

Fabriquer un pot vibrant en utilisant un haut-parleur, connecté à un Générateur Basse Fréquence, et sur lequel une tige métallique est fixée sur la membrane. Positionner alors le haut parleur de façon à ce que la tige métallique soit bien en contact avec la paroi opposée à celle où est fixé l'accéléromètre (cf. Fig.19b). (Vérifier qu'il n'y ait pas de jeu afin qu'elle ne rebondisse pas contre la paroi une fois le pot vibrant en fonction).

Ouvrir le logiciel Audacity.

Actionner le GBF à une fréquence voulue (ici celle du fondamental à 170 Hz détectée sur les spectres du son du conduit hors son pathologique).

Lancer l'acquisition sur Audacity après avoir vérifié que le boîtier de l'accéléromètre était bien allumé. Débuter la vidange.

Remarquer les variations de réponse sur le signal enregistré.



Schéma de montage : (cf. Fig.18)

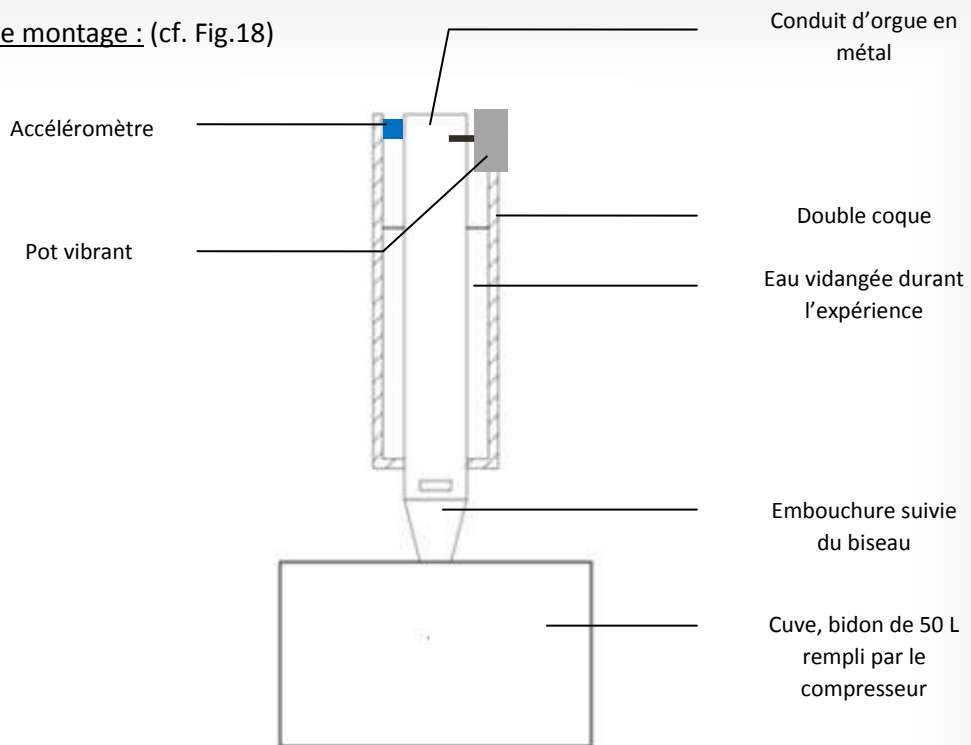


Figure 18 : Schéma de l'expérience

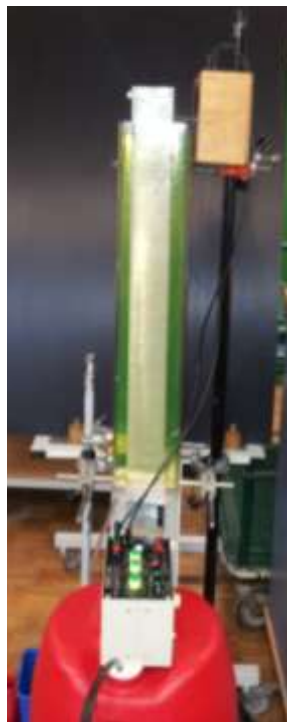


Figure 19 a : Photo de l'expérience



Figure 19 b : Photo du pot vibrant et de l'accéléromètre

Observations et remise en cause de la démarche :

Comme nous le voyons ci-dessous (cf. Fig. 20), nous avons alors observé que la réponse variait en amplitude, alors que le signal du pot vibrant est toujours identique. Les maximums d'amplitude de vibration du tuyau observés correspondent à des situations au cours desquelles les modes de résonance du tuyau coïncident avec la fréquence imposée, ici 170 Hz.

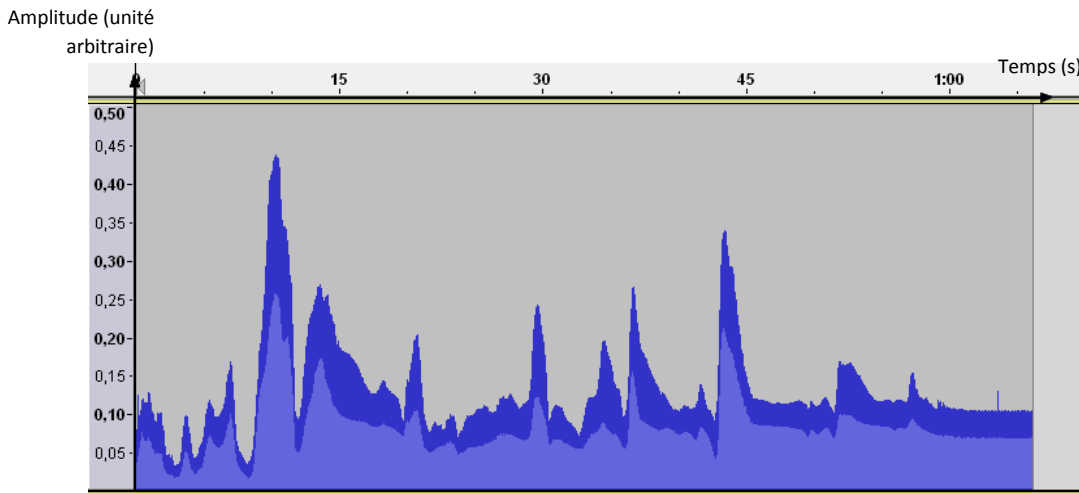


Figure 20 : Réponse en amplitude du conduit excité à 170 Hz

Donc, les modes de résonance mécanique du tuyau changent au cours de la vidange, comme nous l'avions pensé.

Pour compléter cette expérience, nous avons voulu déterminer de quelle façon ces modes de résonance variaient en fonction de la hauteur d'eau. Pour les déterminer, il faut pouvoir enregistrer la vibration du tuyau lorsqu'il vibre librement, il ne faut donc pas lui imposer de fréquence d'excitation. Nous avons alors compris qu'il fallait seulement donner un choc sur la paroi afin de tracer le spectre des fréquences de résonance mécaniques pour différents niveaux d'eau.

- Ainsi, après avoir longtemps cherché la bonne utilisation à faire de l'accéléromètre, voici donc le protocole que nous avons mis en place :

#### Matériel :

- identique à celui utilisé lors de la première expérience sur le montage de Miller ;
- un accéléromètre et son boîtier transformateur ;
- un adaptateur pour entrée microphone d'ordinateur.

#### Protocole :

Fixer l'accéléromètre sur la paroi du tuyau d'orgue dont la cuve périphérique est vide en eau.

Vérifier que l'accéléromètre soit relié au boîtier transformateur alimenté en électricité.

Relier le boîtier de l'accéléromètre à un module connecté à l'ordinateur permettant à ce dernier de le détecter en tant que microphone.

Remplir la cuve en eau tel que le niveau (à partir du fond de la cuve) soit de 66 cm.

Frapper l'arrête, opposée à la face où est positionné l'accéléromètre, avec une tige métallique. En faire l'enregistrement grâce au logiciel Audacity puis analyser le son (en ne prenant pas l'attaque en compte) obtenu en traçant le spectre.

Réitérer la manipulation tous les deux centimètres en baissant le niveau d'eau. (cf. Fig. 21)

Dresser un spectrogramme des fréquences mécaniques en fonction du niveau d'eau (et non en fonction du temps) puis comparer ces fréquences mécaniques aux fréquences acoustiques afin de déterminer les potentielles coïncidences fréquentielles.

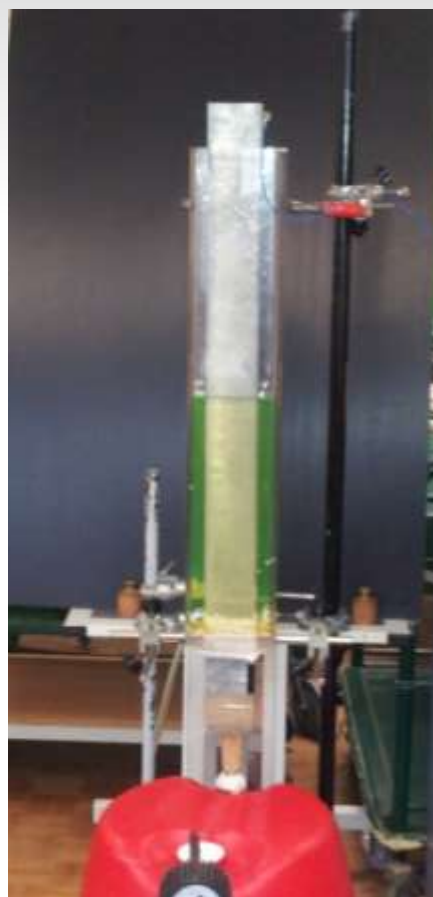


Figure 21 : Photographie du montage

## C. Observations des fréquences mécaniques et interprétations quant à leurs relations avec les fréquences acoustiques

Les chocs sur la paroi produisent de vibrations de la paroi de courte durée (cf. Fig. 22). Pour analyser ces résultats, nous avons

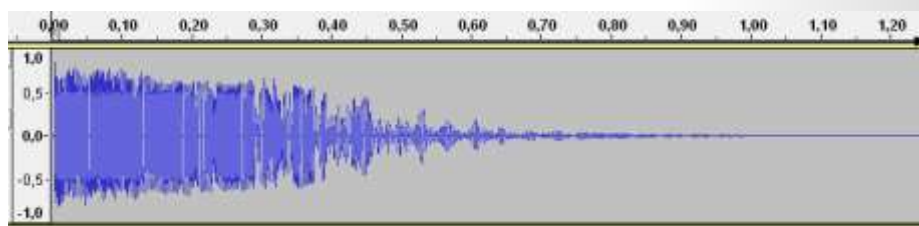


Figure 22 : Enregistrement de la vibration de la paroi après un choc

tracé le spectre de la vibration du tuyau après le choc (cf. Fig. 23). Ce spectre permet de visualiser les pics

fréquentiels de la résonance enregistrée lors du choc sur la paroi. Ces pics sont issus de l'oscillation libre de la paroi. Ils correspondent donc à ses modes de résonance mécanique propres, c'est-à-dire la fréquence à laquelle le tuyau vibre librement, lorsqu'on ne lui impose pas de fréquence de vibration. Ces pics sont assez facilement identifiables, et on peut relever leur fréquence. Nous avons ensuite tracé la fréquence de ces pics en fonction de la hauteur d'eau correspondante. Cela nous a permis de tracer le graphique suivant (cf. Fig. 24):

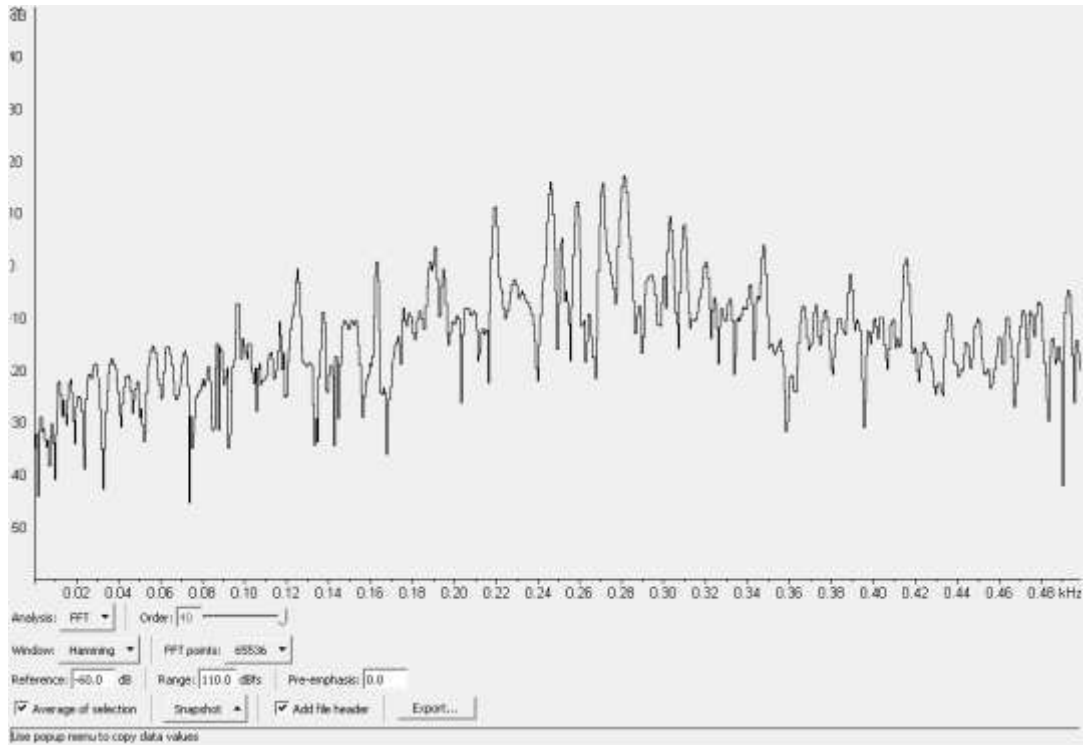


Figure 23 : Spectre de la vibration de la paroi après un choc

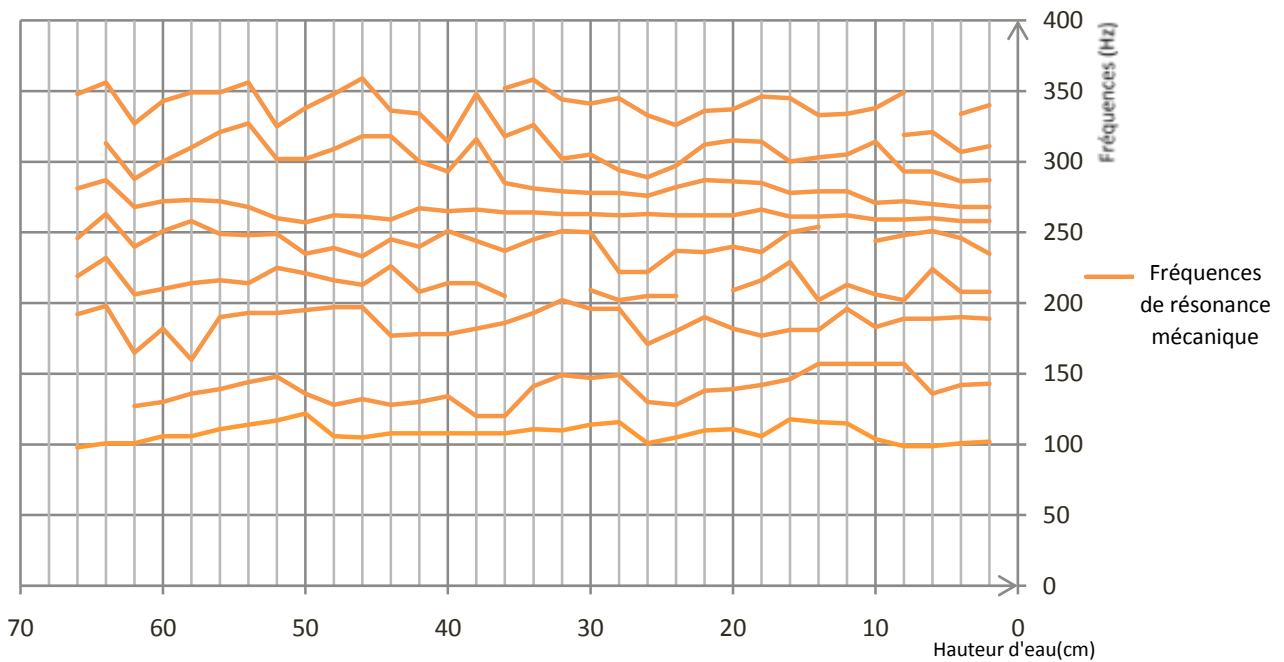
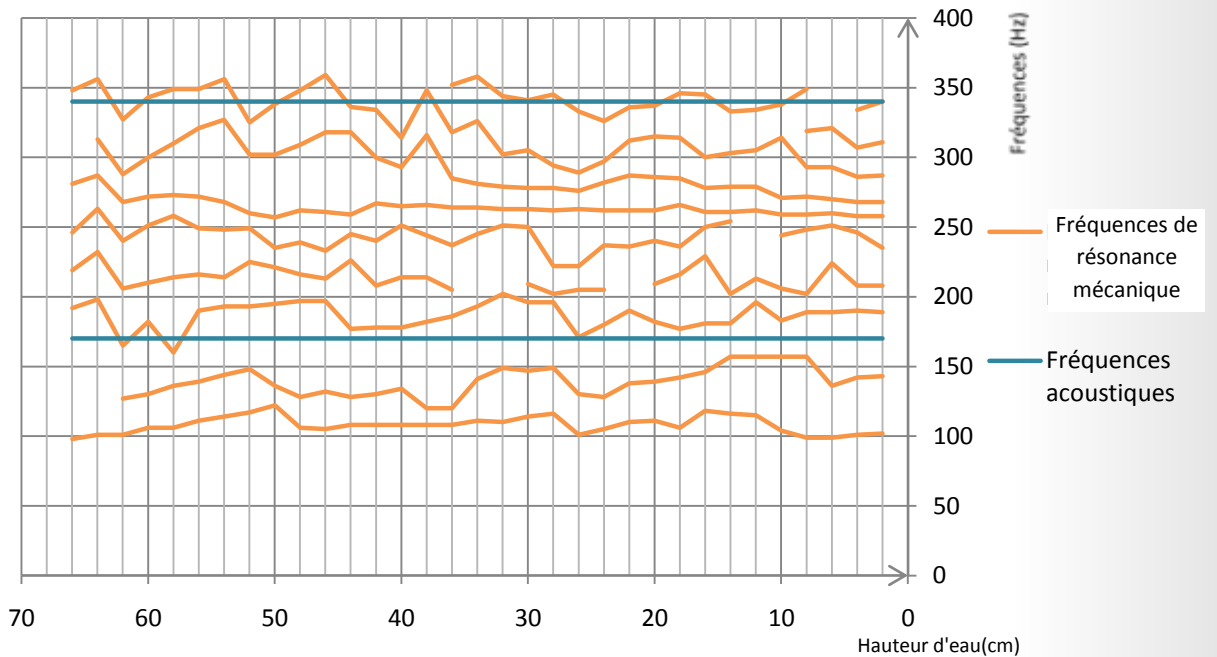


Figure 24 : Graphique des fréquences (ou modes) de résonances mécaniques en fonction de la hauteur d'eau

Les pics relevés ont été ici reliés par souci de clarté, cependant, il y a probablement des sauts entre branches qu'on ne peut voir car les variations de niveaux ne sont peut-être pas assez fines. Malgré cette difficulté, on peut tout de même affirmer que les pics, c'est-à-dire les modes de vibration mécanique du tuyau changent lorsque la hauteur de la

colonne d'eau varie. Cependant, on ne peut pas établir de tendance globale, ou de relation simple entre la hauteur d'eau et les fréquences de ces modes.

Si on ajoute sur ce graphique les fréquences acoustiques, qui sont les fréquences de vibration de la colonne d'air délimitée par le tuyau, on constate que pour certaines hauteurs d'eau, les modes de résonance mécanique de la paroi et les fréquences acoustiques sont les mêmes, elles coïncident (cf. Fig. 25).



**Figure 25 : Graphique mettant en évidence les coïncidences fréquentielles**

Ces hauteurs d'eau où des coïncidences se produisent sont les mêmes que certaines hauteurs d'eau des sons pathologiques relevés précédemment. On peut donc affirmer que les sons pathologiques sont dus à des coïncidences entre les modes de résonance mécanique de la paroi du tuyau et les fréquences acoustiques de la colonne d'air délimitée par le tuyau.

Nous avons remarqué que lorsqu'on excite la paroi du tuyau avec un pot vibrant à sa fréquence de résonance mécanique, son amplitude de vibration est beaucoup plus importante que lorsqu'il est excité à une fréquence qui ne correspond pas à un de ses modes mécaniques.

Si l'on ne peut observer de coïncidence fréquentielle pour tous les niveaux d'eau auxquels nous avons pu relever des sons pathologiques, c'est parce que certaines coïncidences peuvent avoir lieu entre des harmoniques de plus haut rang. Or, ici, nous n'avons relevé que la fondamentale ainsi que les premières harmoniques, qui sont cependant de niveau d'intensité sonore plus élevé et qui donc ont une importance d'autant plus grande, notamment lors de sons pathologiques.

## Récapitulatif :

Au cours de l'expérience de Miller, la colonne d'air délimitée par la paroi du tube est mise en vibration, comme dans tout instrument à vent. La colonne d'air est mise en vibration, donc les particules fluides oscillent autour de leur position au repos. Lorsque le tuyau fonctionne normalement, c'est à dire lorsqu'il est excité par le jet oscillant produit par le biseau, le signal acoustique est périodique. Les différents pics du spectre sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale acoustique. Les variations de pression dans le tube mettent la paroi en vibration. Le spectre d'accélération de la vibration de la paroi mesuré a alors la même structure que le celui du signal acoustique : il s'agit d'un spectre de raies dont les fréquences sont des multiples entiers du fondamental acoustique. La vibration de la colonne d'air impose donc à la paroi du tube une fréquence d'oscillation d'environ 170 Hz ici (en se concentrant sur l'exemple de la fondamentale). Lorsque la colonne d'eau est pleine, cette fréquence de 170 Hz et les fréquences harmoniques correspondantes ne correspondent à aucun mode de résonance pour le tuyau, il vibre donc très faiblement. Lorsque la colonne d'eau descend, les modes de résonance mécanique du tuyau changent, et lorsque l'une d'elle s'approche de 170 Hz, ou des fréquences multiples de celle-ci, le tuyau vibre avec plus d'intensité. Comme sa vibration est importante, cette dernière perturbe la vibration de la colonne d'air, et crée ainsi un son pathologique.

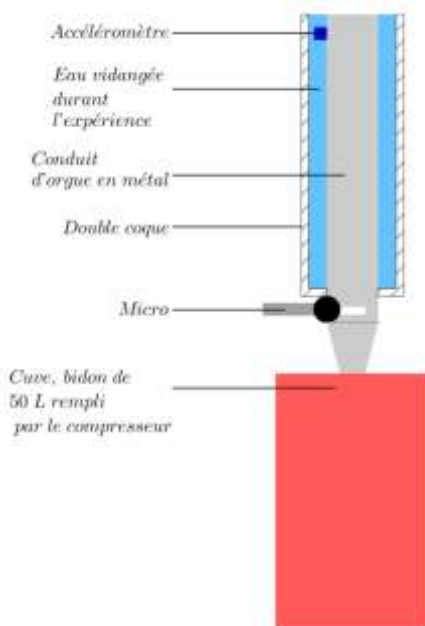


Figure 26 a: Schéma de l'expérience lors d'une situation d'absence de son pathologique

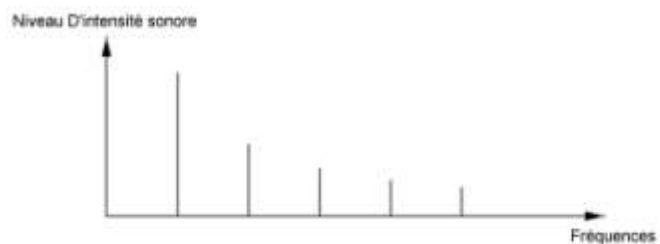


Figure 26 b: Signal acoustique obtenu par le micro au cours de l'expérience

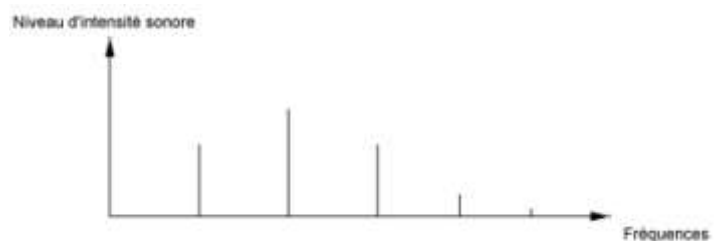


Figure 26 c: Modes de résonance mécanique de tuyau obtenus par analyse spectrale de la vibration de la paroi enregistrée par l'accéléromètre après chocs contre celle-ci

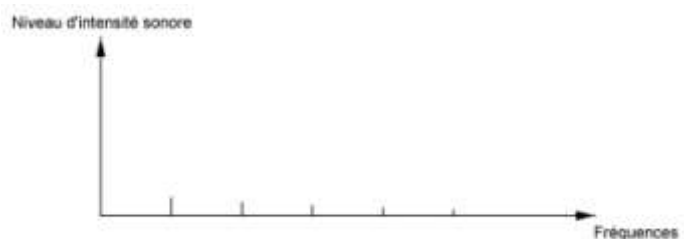


Figure 26 d: Signal mécanique du tuyau au cours de l'expérience obtenu par l'accéléromètre

Lorsque la colonne d'eau est pleine (cf. Fig. 26 a), il n'y a pas de coïncidence entre les modes de résonances mécaniques du tuyau (cf. Fig. 26 c) et les fréquences de vibration de la colonne d'air (cf. Fig. 26 b), le tuyau a donc une vibration de faible amplitude (cf. Fig. 26 d).

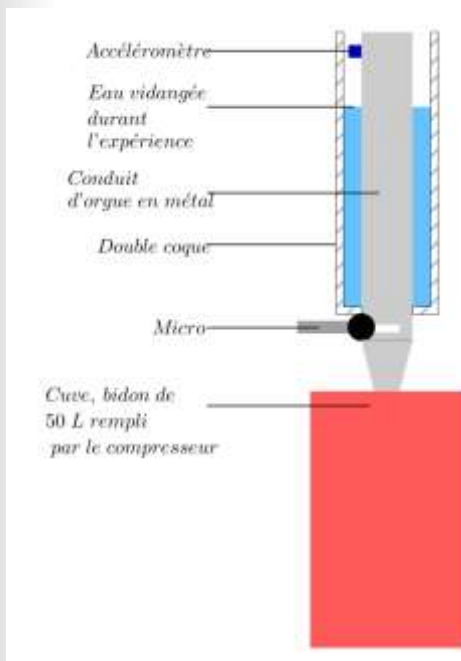


Figure 27 a: Schéma de l'expérience lors d'une situation de son pathologique



Figure 27 b: Signal acoustique obtenu par le micro au cours de l'expérience

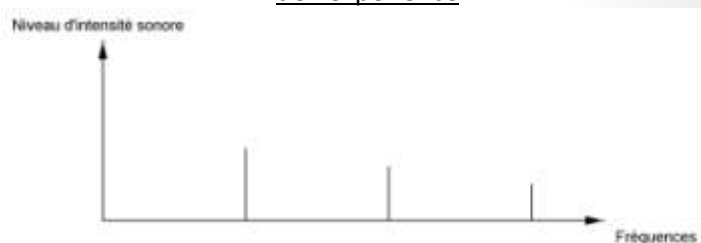


Figure 27 c: Modes de résonance mécanique de tuyau obtenus par analyse spectrale de la vibration de la paroi enregistrée par l'accéléromètre après chocs contre celle-ci

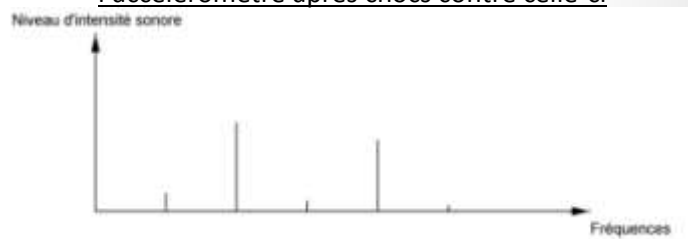


Figure 27 d: Signal mécanique du tuyau au cours de l'expérience obtenu par l'accéléromètre

Pour certaines hauteurs de la colonne d'eau, les modes de résonance mécanique du tuyau (cf. Fig. 27 c) et les fréquences de vibration de la colonne d'air (cf. Fig. 27 b) coïncident, c'est le cas sur cette illustration, il y a notamment coïncidence entre le premier mode de résonance mécanique de la paroi du tuyau et le deuxième harmonique de la vibration de la colonne d'air. Le tuyau a donc une amplitude de vibration plus importante pour ces fréquences (cf. Fig. 27 d). Cette vibration est assez importante pour perturber la vibration de la colonne d'air, un son pathologique est créé.

# Conclusion

Ainsi, nous n'avons pu, lors de nos premières observations, observer des différences notables, significatives entre nos différents tubes de bois. Nous avons, avec l'aide de François Gautier, pu déterminer que les facteurs d'incertitudes. Cela aurait donc conforté l'hypothèse selon laquelle il n'y aurait pas d'influence significative du matériau de la paroi sur le son émis.

Cependant, dans le cas de conduits sonores de la dimension d'un tuyau d'orgue, comme nous l'avons vu dans l'expérience de Miller, le matériau de la paroi (modélisé par les différents niveaux d'eau) a une influence sur le son émis par l'instrument, dans certaines conditions liées aux caractéristiques de la paroi et donc du matériau, donnant alors lieu à des sons pathologiques. En effet, lorsque le niveau d'eau est modifié, les modes de résonances mécaniques changent, pouvant alors être en coïncidence fréquentielle avec les fréquences acoustiques. Ces coïncidences peuvent alors donner lieu, comme nous l'avons vu, à des sons pathologiques. Cependant, ces cas sont extrêmement rares, ils dépendent des dimensions et du matériau du conduit avec des conditions très spécifiques, et n'influencent pas que sur le timbre, comme nous l'avons pensé au début de nos travaux, mais également sur la hauteur du son. De fait, il est très complexe de prévoir les modes mécaniques selon les conditions limites et, ici, le matériau puisqu'il n'existe pas de relation simple.

L'influence de la vibration de la paroi est donc, dans la plupart des cas extrêmement faible et souvent inaudible. Il faut certaines conditions très particulières pour que cette influence soit notable.

Le mythe est malgré tout encore existant. Il y a toujours débat entre les acousticiens et les musiciens et facteurs d'instruments, encore persuadés de l'influence majeure du matériau de la paroi. Cela pourrait s'expliquer, comme le démontrent les tests à l'aveugle par le fait que nous attribuons, inconsciemment, une qualité acoustique à l'instrument en fonction de la valeur du matériau, qui représente cependant un intérêt pour sa résistance aux variations de température et d'humidité.



# Annexe 1

Pour comparer la différence des spectres par rapport aux incertitudes associées en I 3, nous avons utilisé l'algorithme de traitement suivant :  $=((ABS(B5-D5))>C5)+((ABS(B5-D5))>E5)$ , où les cellules B5 et D5 correspondent aux niveaux d'intensité sonore des harmoniques à comparer et les cellules C5 et E5 correspondent aux incertitudes associées.

Les incertitudes calculées sont des incertitudes de répétabilité à 95 %.

Comparaison														
	Essence 1		Essence 2		Essence 3		Essence 4		E1-E2	E1-E3	E1-E4	E2-E3	E2-E4	E3-E4
	Moyenne	U	Moyenne	U	Moyenne	U	Moyenne	U						
4	Fréquence (Hz)	Niveau (dB)	Niveau (dB)	Niveau (dB)	Niveau (dB)	Niveau (dB)	Niveau (dB)	Niveau (dB)	Niveau (dB)					
5	586,779785	0	1,12535656	0	1,254957261	0	1,514020215	0	0,985391001	0	0	0	0	0
6	1173,55957	-41,20440685	2,33420663	-39,1113769	2,038638469	-40,2019551	1,54526391	-39,28061215	1,474101615	1	0	1	0	0
7	1760,339355	-31,56215685	2,59484581	-28,9171897	2,001948594	-29,8273538	2,18965294	-30,8380853	1,273329736	2	0	0	0	1
8	2347,119141	-43,11249815	3,02146542	-37,2394123	2,76245315	-37,8256641	2,994834641	-41,37421285	1,468832032	2	2	1	0	2
9	2936,590576	-33,49319025	3,35459093	-40,6135591	3,407757642	-38,7248352	3,338806805	-39,1183885	2,20874234	2	2	2	0	0
10	3520,678711	-51,24404795	3,32131584	-52,0040176	2,91855219	-51,9294657	3,065763501	-52,4410209	2,524420636	0	0	0	0	0
11	4112,841797	-42,84129005	3,29346946	-43,8281113	2,688161356	-44,196685	3,503816584	-48,3350684	3,41092245	0	0	2	0	2
12	4694,238281	-52,7368329	2,52488393	-51,2255635	2,735918385	-55,1251408	2,532567158	-56,35614725	2,355400169	0	0	2	2	2
13	5286,401367	-51,53864985	3,6055651	-55,4701705	3,4790455	-63,6568208	4,107114642	-57,20049235	2,928073438	2	2	2	2	0
14	5867,797852	-68,93461275	2,84428914	-65,2067833	2,067265713	-68,2066732	3,109425847	-67,76283295	2,708827879	2	0	0	1	1
15	6451,885986	-62,35325255	2,97107054	-66,6516132	1,496654861	-68,2881046	2,522745739	-68,11419215	1,466992319	2	2	2	1	0

Tableau de comparaison aux incertitudes avec les harmoniques égalisées

Le 0 signifie que les différences d'intensité sonore entre deux harmoniques ne sont supérieures à aucune des deux incertitudes associées ; le 1 signifie qu'elles sont supérieures à une seule des deux incertitudes associées, et le 2 signifie qu'elles sont supérieures aux deux incertitudes associées.

Plus simplement, le 0 signifie « résultat non probant », le 1 « résultat peu probant », et le 2 « résultat probant ».

# Annexe 2

Le tableau suivant montre les différents niveaux d'eau grâce à une analyse de vidéos de l'expérience auxquels nous avons repéré des sons pathologiques. Nous avons également estimé les incertitudes liées à ces niveaux d'eau.

Type de son pathologique	Niveau d'eau (en m) Vidéo 1	Niveau d'eau (en m) Vidéo 2	Niveau d'eau (en m) Vidéo 3	Niveau d'eau (en m) Vidéo 4	Niveau d'eau (en m) Vidéo 5	Moyennes	Incertitude	1	2
Extinction	60,1	60,1	50,3	59,6	60,3	60,2	0,6796975	60,2	60,2
Cgrt1 +	51,6	51,4	50,3	51,6	51,0	51,6	0,5507951	51,6	0,0
Extinction	50,6	49,2	49,7	48,6	49,2	50,4	0,6850181	50,4	0,0
Battement	49,2	46,3	44,5	48,6	48,2	48,9	0,2195883	48,9	48,1
Ampli (avec décroissance)	49,2	45,7	44,5	48,6	48,2	48,9	0,2195886	48,9	48,1
Extinction	43,6	43,3	42,8	43,6	43,4	43,4	0,8797647	43,4	43,3
Aténuation	41,9	41,1	39,3	41,8	39,7	42,1	1,4962481	42,1	42,1
Cgrt1 +	40,6	39,9	38,7	40,0	39,7	39,7	1,0869044	39,7	39,0
Battement	38,2	39,9	38,1	38,6	38,6	38,8	0,7887838	38,8	38,8
Extinction	38,2	39,9	38,1	38,6	38,2	39,2	1,3857605	39,2	38,5
Battement	38,2	39,9	38,1	38,6	38,7	38,8	0,7887838	38,8	38,7
Ampli (avec décroissance)	37,3	36,5	36,1	37,7	37,1	38,5	1,34773875	38,5	38,6
Extinction brève	36,8	36,5	36,1	36,4	37,1	36,6	0,3001634	36,6	36,3
Battement	36,8	36,5	36,1	36,4	37,1	36,8	0,5985801	36,8	36,5
Ampli (avec décroissance)	36,8	34,9	34,2	36,4	35,1	36,7	0,41172891	36,7	34,6
Aténuation	34,3	34,3	34,2	34,2	35,1	34,5	0,35113741	34,5	34,6
Cgrt1 +	30,9	28,2	28,4	32,3	29,7	31,8	2,2792783	29,7	0,0
Battement	29,8	28,2	27,7	29,5	28,4	28,9	0,9353536	28,9	28,3
Ampli (avec décroissance)	28,2	28,1	27,7	28,4	26,4	28,4	0,3948619	28,4	28,3
Cgrt1 +	28,2	26	25,8	27,7	26,4	28,1	0,3948619	28,1	28,8
Extinction brève	26	26	25,8	29,0	26,4	26,8	2,0700069	26,8	0,0
Battement	25,2	24,3	24,5	29,0	25,3	26,5	2,1048742	26,5	0,0
Ampli (avec décroissance)	25,2	23,8	22,6	29,0	24,3	26,1	2,8498281	26,1	0,0
Extinction	23,8	22,7	21,9	26,0	23,3	24,2	1,968123	24,2	22,6
Cgrt1 +	23,8	21,9	21,9	27,9	24,3	25,7	2,8408059	25,7	0,0
Battement	21,9	21,9	21,9	29,0	24,3	24,7	4,0723915	24,7	0,0
Ampli (avec décroissance)	21,9	21,9	21,9	29,0	24,3	24,9	4,9595081	24,9	0,0
Extinction	21,9	21,9	21,9	24,1	23,3	24,1	0,3001634	24,1	0,0
Battement	21,9	21,9	21,9	24,1	23,3	24,1	0,3001634	24,1	0,0
Ampli (avec décroissance)	21,9	21,9	21,9	24,1	23,3	24,1	0,3001634	24,1	0,0
Cgrt1 -	22,7	19,2	16,8	22,2	18,1	22,4	0,439135	22,4	23,2
Aténuation	18,6	17,9	16,8	17,0	16,1	17,7	1,6951736	17,7	17,2
Cgrt1 +	17,9	17,9	16,1	16,7	17,4	17,6	1,8294364	17,6	17,0
Extinction	17,1	14,1	13,5	16,4	16,4	17,1	1,0271336	17,1	17,1
Ampli (avec décroissance)	8,4	7,6	7,7	8,8	7,9	9,3	1,0398694	9,3	13,6
Cgrt1 +	7,6	8,1	7,7	8,2	7,9	7,9	1,7894427	7,9	7,9
Extinction	7,6	8,1	7,7	8,2	7,9	7,9	0,3473065	7,9	7,9
Battement	7,6	8,1	7,7	8,2	7,9	7,9	0,4006288	7,9	0,0
Ampli (avec décroissance)	7,6	8,1	7,7	8,2	7,9	7,7	0,6105991	7,7	5,3

Tableau relevant les sons pathologiques et les niveaux d'eau auxquels ils ont lieu

## Remerciements

Nous remercions notre professeur de Sciences Physiques, Monsieur Fabrice Le Meignen, ainsi que les techniciens de laboratoire du Lycée Joachim du Bellay, pour leur aide tout au long de ce travail. Nous remercions également Monsieur Boyrie pour ses précieux conseils et particulièrement Monsieur François Gautier, chercheur en vibroacoustique au LAUM, pour avoir accepté de nous suivre et nous aider dans cette aventure, et pour son impressionnante expérience.

## Bibliographie

- [1] D.C. Miller, The influence of the material of wind-instruments on the tone quality, *Science* 29, 161-171 (1909).
- [2] F. Gautier, G. Nief, J. Gilbert, J.P. Dalmont, Vibroacoustics of organ pipes- Revisiting the Miller experiment, *J. Acoust. Soc. Am.*, 131, 737-738, 2011.
- [3] G. Nief, Couplage fluide-interne-structure mécanique, application aux instruments de musique à vent, PhD, Université du Maine, Le Mans, France, 2008.
- [4] G. Nief, F. Gautier, J.P. Dalmont, J. Gilbert, Influence of wall vibrations on the behaviour of a simplified wind instrument, *J. Acoust. Soc. Am.*, 124, 1320-1331, (2008).
- [5] W. Kausel, D.W. Zietlow, T.R. Moore, Influence of wall vibrations on the sound of brass wind instruments, *J. Acoust. Soc. Am.*, 128, 3161-3174, (2010).
- [6] Hatier, Physique chimie T S.