

BONBOIRE Damien
KASPRZACK Stanislas
LE GALL Corentin

Avec la collaboration de
Fabrice Le Meignen,
enseignant 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

Rapport concours C Génial

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



SOMMAIRE

INTRODUCTION

I. ANALYSE SPECTRALE D'UNE FLUTE

II. MISE EN EVIDENCE DE SONS PATHOLOGIQUES AU MOYEN DE L'EXPERIENCE DE MILLER

III. ANALYSE VIBRATOIRE DU TUYAU D'ORGUE ET REMISE EN QUESTION DE L'HYPOTHESE

IV. APPLICATIONS INDUSTRIELLES

CONCLUSION

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

Introduction

Notre passion pour la musique nous a poussés à nous demander, dans le cadre de nos TPE, si le matériau de la paroi d'un instrument de musique à vent avait une influence sur le son émis. Nous avons poursuivi notre effort dans l'objectif de participer au concours C Génial, en collaboration avec M. Gautier, enseignant-chercheur en vibroacoustique au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM), et vous proposons ici de découvrir nos travaux.

Habituellement nous n'étudions que la partie acoustique d'un instrument, nous aborderons ici la partie vibratoire qui, malgré qu'elle soit oubliée par approximation, a une grande importance.

I. Analyse spectrale d'une flûte

A. Démarche expérimentale

Pour répondre à notre problématique, nous avons fabriqué quatre conduits de flûte identiques en ébène, buis, pin, et érable, que nous avons adapté successivement sur un même bec. Nous faisons alors sonner le tout grâce à une soufflerie.

Nous avons effectué vingt enregistrements pour chaque tube de bois, afin d'estimer l'incertitude de répétabilité, pour déterminer l'influence de l'essence de la paroi sur le son émis par la flûte.

- Les tubes de bois

M. Boyrie, facteur d'instruments nous a conseillé les essences suivantes: ébène, buis, très utilisées ; l'érable et le pin, moins utilisées mais différents des précédentes. Pour déterminer les cotes et tourner nos conduits, nous avons contacté un ébéniste, M. Fasilteau.



Figure 1 : Cotes et vue tridimensionnelle du conduit

- La soufflerie

Nous avons mis en place une soufflerie constituée d'un compresseur à air de débit constant relié à un pistolet de gonflage adapté à une chambre à air.

Nous avons ainsi pu dresser ce protocole:

Protocole :

Remplir le compresseur.

Connecter le microphone à l'ordinateur. Adapter un tube de bois sur le bec relié à la soufflerie.

Appuyer sur le pistolet de gonflage.

Enregistrer le son produit, tracer le spectre.

Faire de même pour les autres tubes.

Schéma du montage : (cf. Fig. 2)

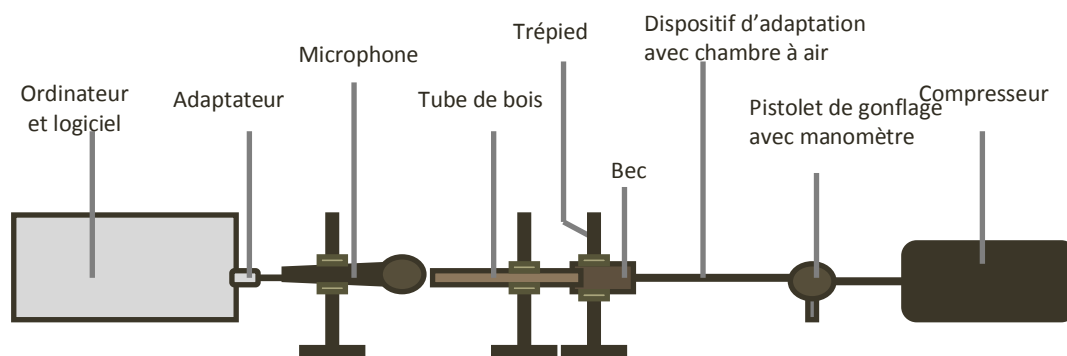


Figure 2 : Schéma du montage

B. Observations et interprétations

Nous avons alors enregistré le son émis par nos flûtes puis avons réalisé une analyse spectrale grâce au logiciel Audacity.

La répétition des enregistrements nous a permis d'obtenir une moyenne et une incertitude de répétabilité qui nous ont permis de comparer les spectres.

Ce graphique (cf. Fig. 3), qui est une superposition des spectres moyens, affiche le niveau d'intensité sonore relatif en dB en fonction de la fréquence. Les différences au niveau des harmoniques sont difficilement visualisables.

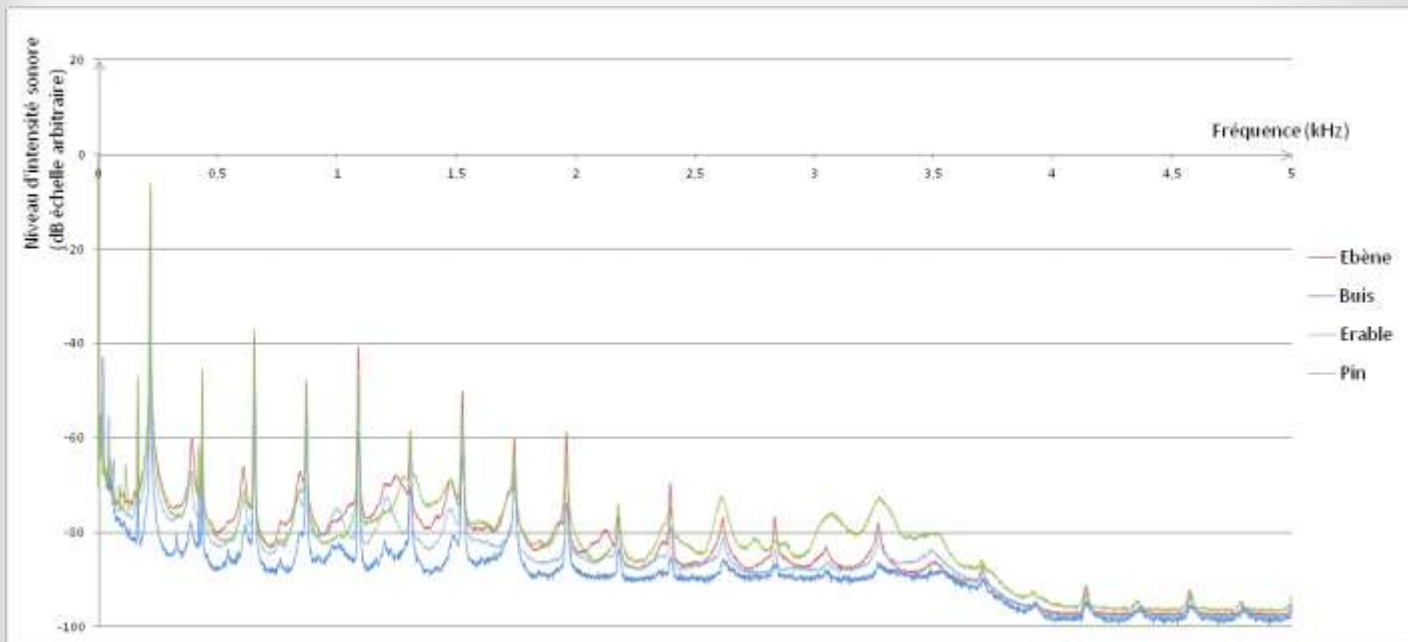


Figure 3 : Comparaison des moyennes des enregistrements pour chaque essence de bois

Nous avons repéré graphiquement les principales harmoniques de chaque spectre et avons ensuite voulu savoir si les écarts d'intensité sonore entre deux essences au niveau des harmoniques étaient supérieurs ou non aux incertitudes associées (cf. Fig.4). Les résultats sont considérés non probants si la différence d'intensité n'est supérieure à aucune des incertitudes associées ; peu probants si celle-ci est supérieure à une seule ; probants si elle est supérieure aux deux.

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

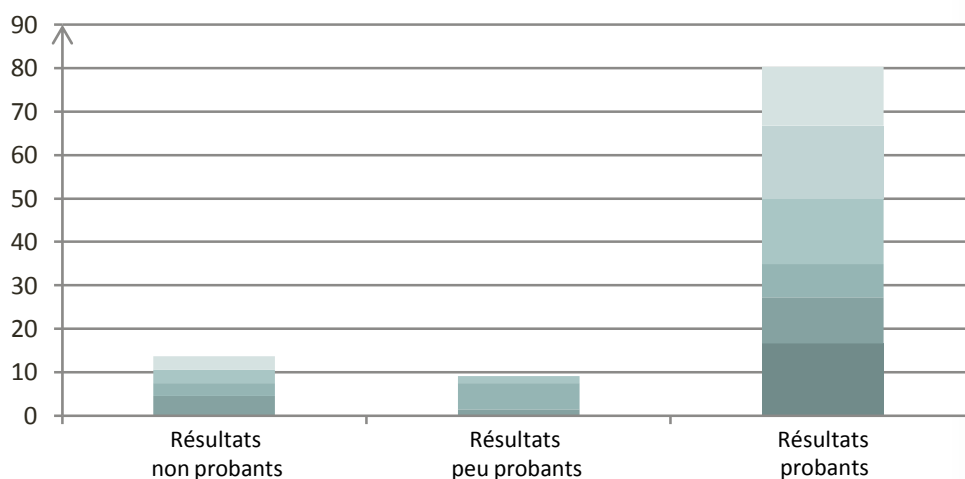


Figure 4 : Tableau des résultats obtenus

80% des résultats sont probants. Donc, les spectres et les sons obtenus seraient vraiment différents.

Traçons les valeurs étudiées (cf. Fig.5) :

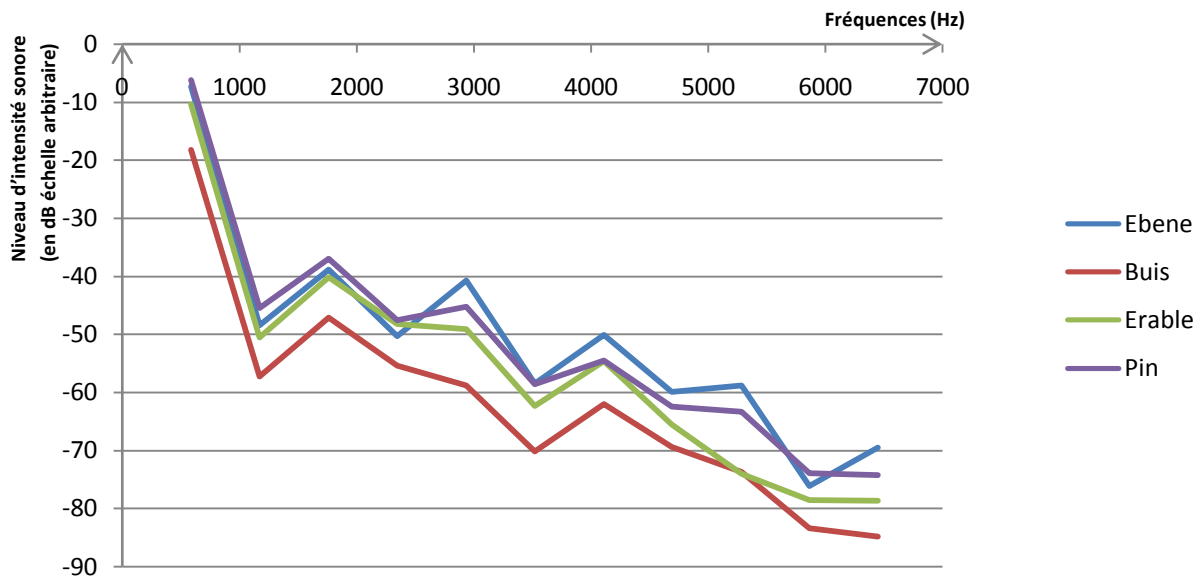


Figure 5 : Tableau comparatif des spectres obtenus

On note que l'intensité des harmoniques du buis est inférieure à celle de l'érable, elle-même inférieure à celle de l'ébène et du pin.

Cependant, nous avons remarqué que le volume sonore général des enregistrements peut varier, et donc l'intensité des spectres associés aussi. Il faut donc normaliser la première harmonique de chaque spectre à 0 (cf. Fig.6).

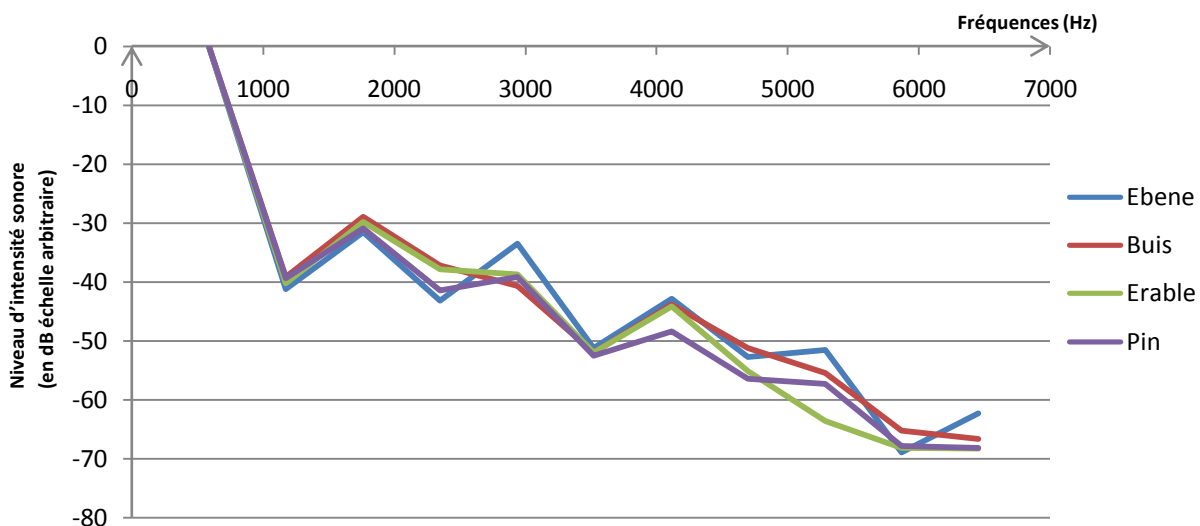


Figure 6 : Tableau comparatif des spectres obtenus après égalisation

Les différences observées auparavant ne sont plus si évidentes.

De plus, nous avons de nouveau estimé les différences par rapport aux incertitudes (cf. Fig.7). (cf. Annexe 1)

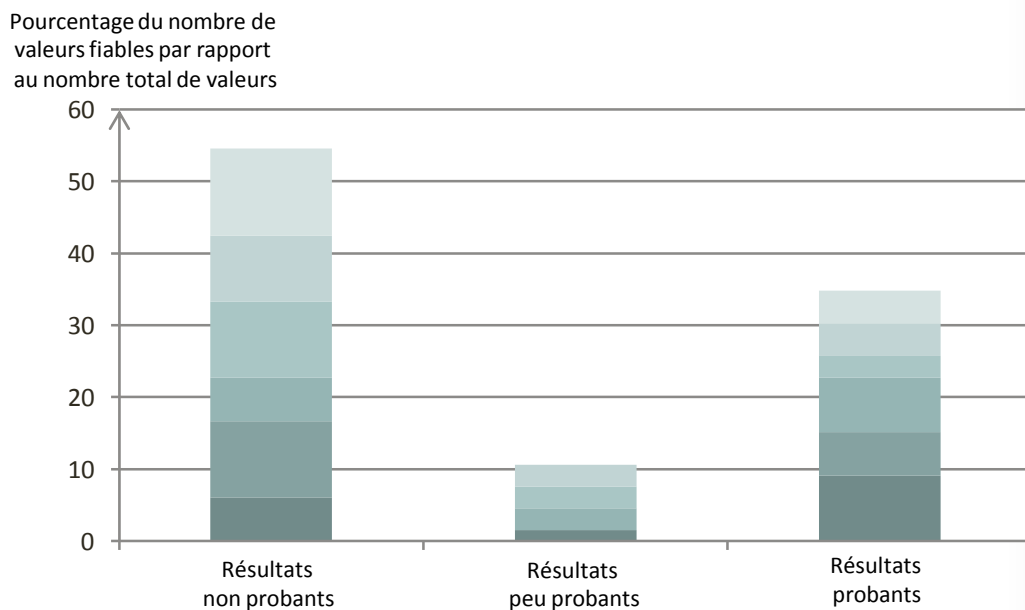


Figure 7 : Tableau des résultats obtenus après égalisation

Plus de 65% des résultats ne sont pas ou peu probants, après égalisation. 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 ces instruments.

C. Remise en question

Avant ces travaux, lors de notre présentation en TPE, nous étions convaincus que l'ébène avait des qualités sonores supérieures aux autres bois. Avec M. Gautier, enseignant-chercheur en vibroacoustique au LAUM nous avons montré en quoi nos résultats n'étaient pas exploitables. Des paramètres tels que l'arrivée d'air ; la distance entre le micro et la flûte ; l'imperfection de la géométrie du conduit ; la rugosité de la surface interne du tube ; les variations de la pression sortant du compresseur ont une influence sur le son émis largement supérieure celle de la vibration de la paroi.

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

A. Démarche expérimentale

Afin de mettre en évidence l'influence de la paroi sur le son émis, nous avons alors cherché à étudier un instrument de plus grandes dimensions, le tuyau d'orgue, au travers de l'expérience de Dayton Miller, l'un des fondateurs de la société américaine d'acoustique. Il publiait en 1909 une étude dans laquelle une de ses expériences consistait à remplir d'eau la double coque d'un tuyau d'orgue, appliquant une pression sur les parois. Il observait que certains niveaux de remplissage donnent lieu à des sons atypiques. Tous les paramètres de l'expérience sauf un restent inchangés, mettant ainsi en évidence la seule vibration de la paroi. Dans notre reproduction de l'expérience, la soufflerie a été améliorée avec l'installation d'un bidon stabilisant le flux d'air.

Protocole :

- Remplir le compresseur.
- Remplir la double coque d'eau.
- Ouvrir le compresseur jusqu'à l'obtention du son voulu.
- Lancer l'enregistrement.
- Ouvrir débuter la vidange de la double coque.

Schéma du montage : (cf. Fig.8)

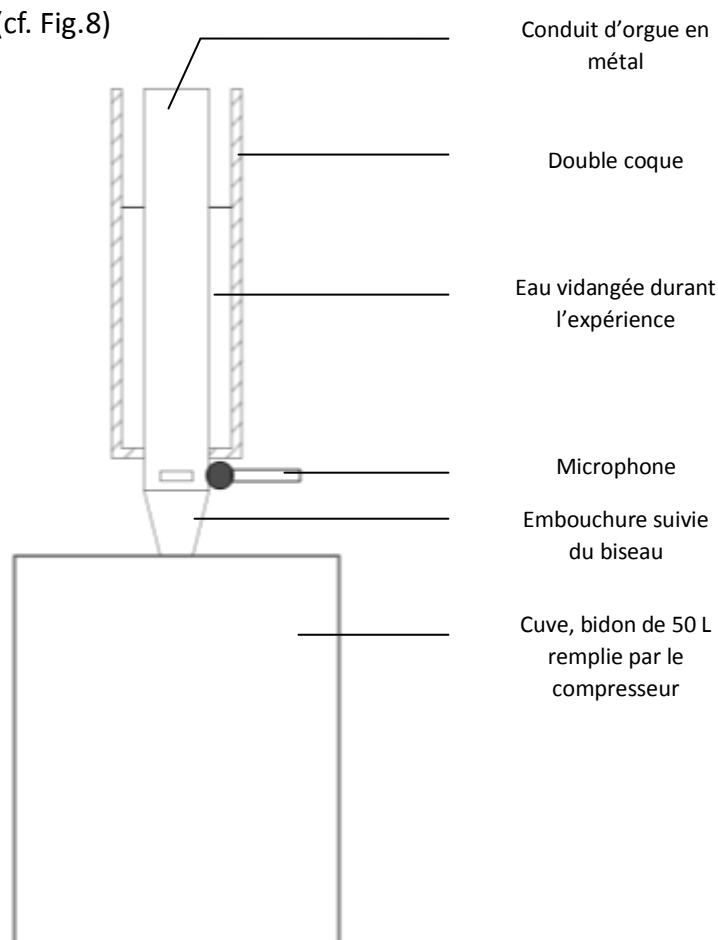


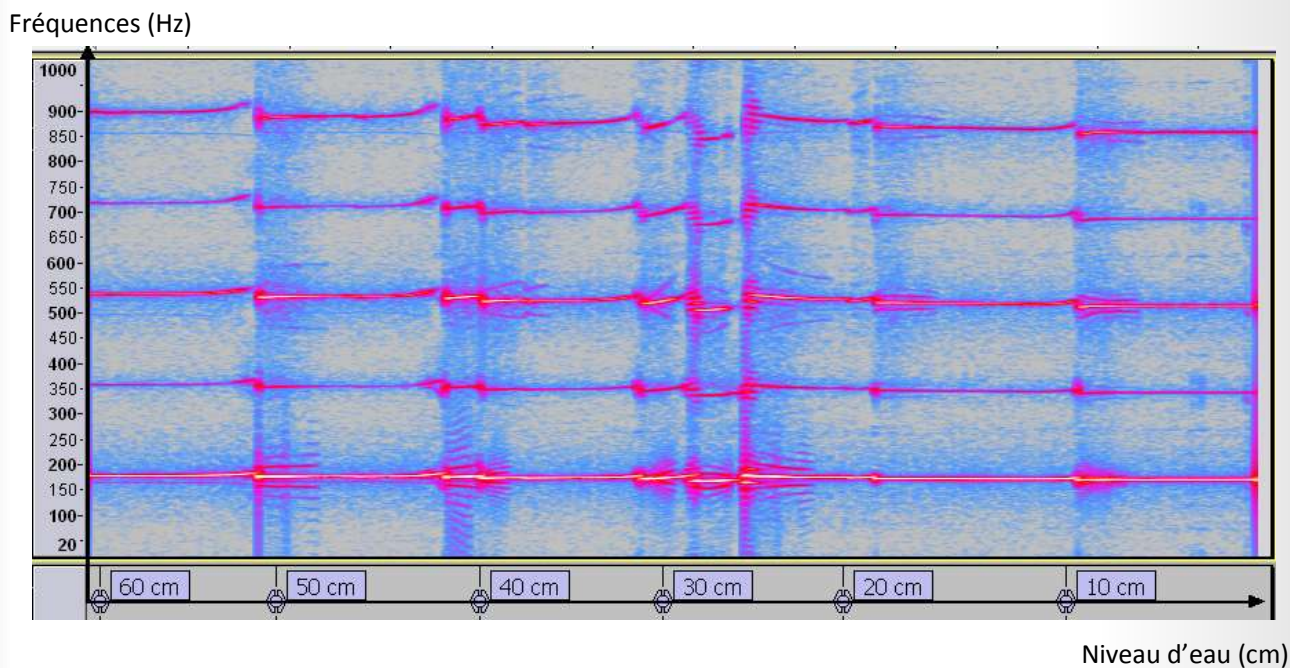
Figure 8 : Schéma de montage de l'expérience historique de Miller

B. Premières observations

On entend pour certaines hauteurs d'eau des sons atypiques, d'où l'idée de tuyau pathologique. L'enregistrement de l'expérience nous permet d'afficher son spectrogramme, qui affiche la fréquence en fonction du temps. A chaque point du graphique est attribuée une intensité lumineuse qui indique l'amplitude d'une fréquence particulière à un temps donné.

Nous avons relevé par analyse de cinq vidéos les niveaux auxquels apparaissent des sons pathologiques, en estimant leur incertitude (cf. annexe 2). 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. 9).



Ce spectrogramme nous permet de repérer trois types de sons pathologiques : changement de hauteur ; interruption du son ; battements. (cf. Fig.10)

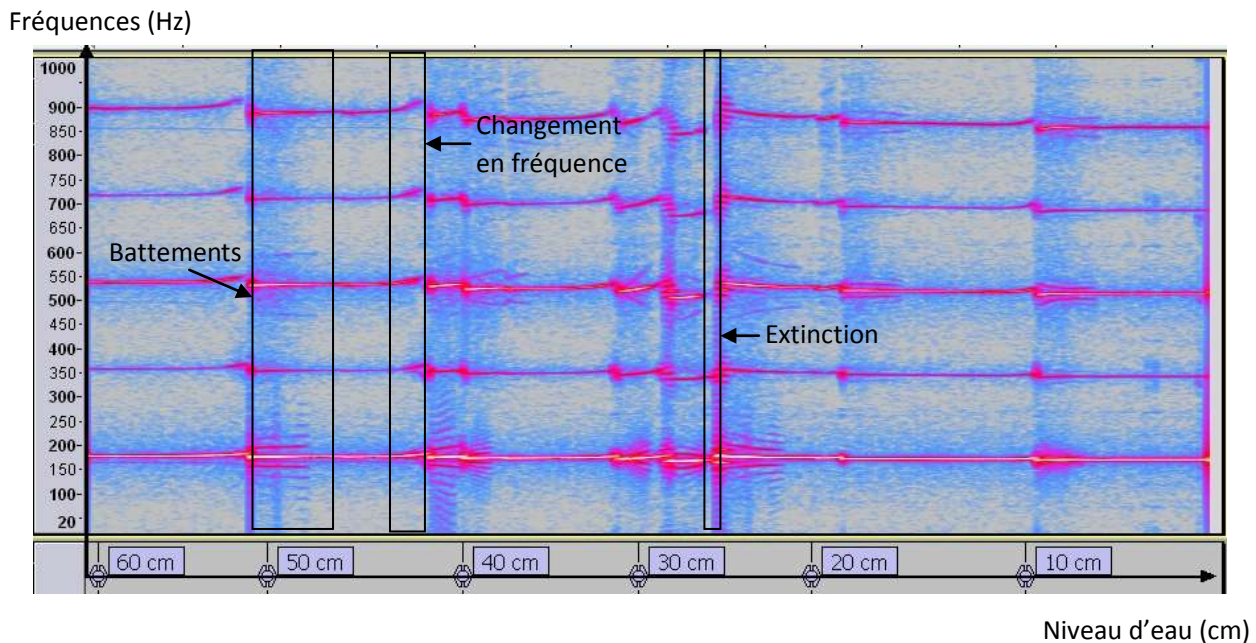


Figure 10 : Spectrogramme du son enregistré provenant de l'expérience de Miller

C. Hypothèses

Ayant observé l'apparition de sons pathologiques lors de la vidange en eau et ne faisant varier qu'un paramètre lié à la paroi, nous avons ainsi mis en évidence son influence sur le son émis par cet instrument.

Nous avons émis l'hypothèse suivante :

Lorsque nous vidons la cuve en eau, nous modifions la pression sur le tube de métal, donc sa capacité à entrer en vibration, et donc ses modes de résonances mécaniques en faisant diminuer les fréquences de ces modes.

Or, les modes mécaniques dépendent de la géométrie et du matériau. Les modes mécaniques étant une des caractéristiques 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. Cette expérience met donc en évidence l'influence de la vibration du matériau de la paroi sur le son émis par un instrument à vent de dimensions semblables à celles du tuyau d'orgue étudié.

Il nous restait donc alors à comprendre le comportement des modes mécaniques.

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

A. Introduction à la vibroacoustique

La vibroacoustique étudie les ondes mécaniques dans les structures et comment celles-ci interagissent et rayonnent dans le fluide environnant, ici l'air. Il existe de trois types de couplages vibroacoustiques : le couplage interne, externe et excitateur. (cf. Fig.11) L'expérience de Miller permet de mettre en évidence le couplage vibroacoustique interne entre les modes mécaniques de la paroi et les ondes acoustiques.

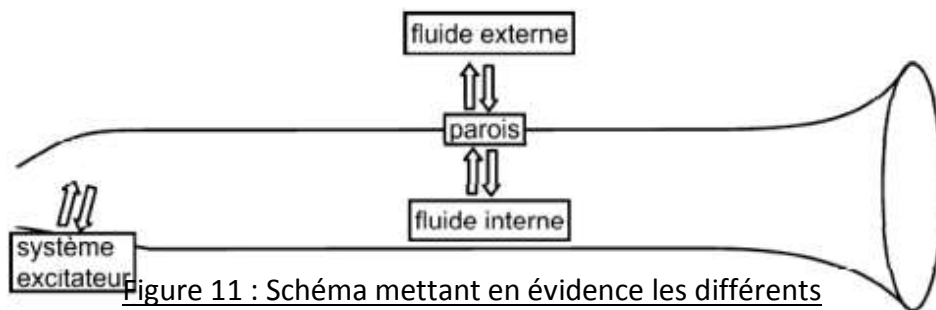


Figure 11 : Schéma mettant en évidence les différents couplages mis en jeu dans chez un instrument à vent

B. Démarche expérimentale

Nous avons voulu enregistrer, au moyen d'un accéléromètre, les vibrations de la paroi lors de la vidange en eau afin de déterminer les fréquences des modes mécaniques en fonction du niveau d'eau lors de l'expérience.

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 de nombreux essais (3 jours de travail pendant les vacances de Noël !):

- Afin de mesurer la réponse en amplitude du conduit, nous avons utilisé un pot vibrant fabriqué par nos soins avec un haut parleur et un GBF, pour imposer une fréquence de vibration au tuyau. La vibration imposée est toujours identique, seul le niveau d'eau change.

Protocole :

Remplir la double coque d'eau.

Fixer l'accéléromètre sur la paroi du tuyau.

Relier l'accéléromètre à l'ordinateur, sur l'entrée microphone

Positionner le haut parleur relié au GBF pour que sa tige métallique appuie sur la paroi opposée à celle où est fixé l'accéléromètre.

Ouvrir le logiciel Audacity.

Actionner le GBF à la fréquence voulue (ici celle du fondamental acoustique à 170 Hz).

Lancer l'acquisition. Débuter la vidange en eau.

Schéma de montage : (cf. Fig.12)

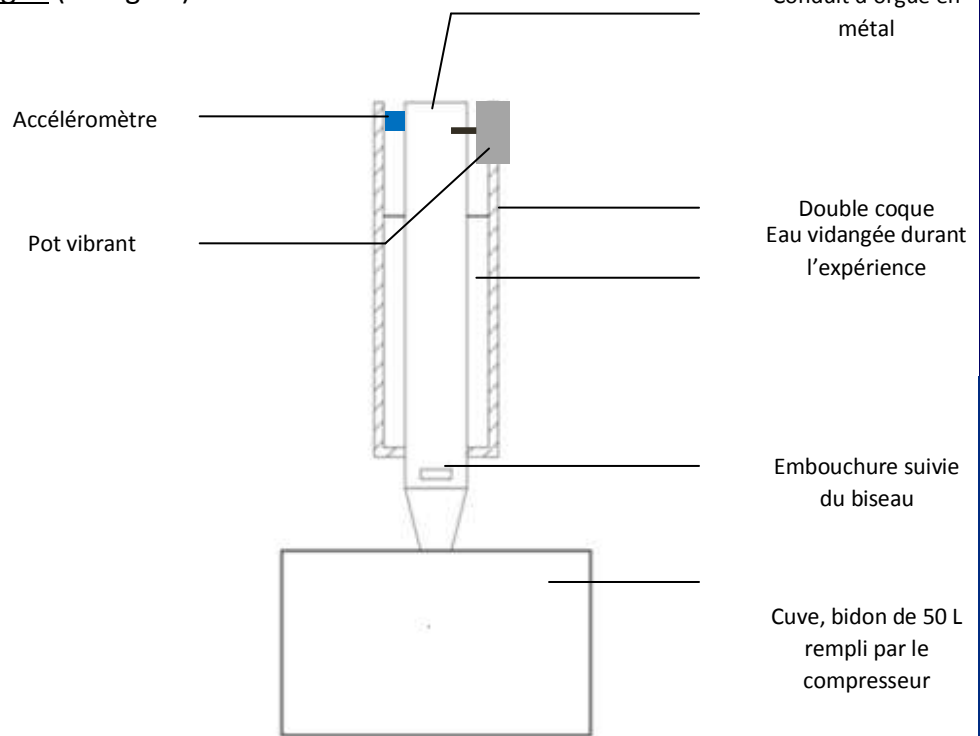
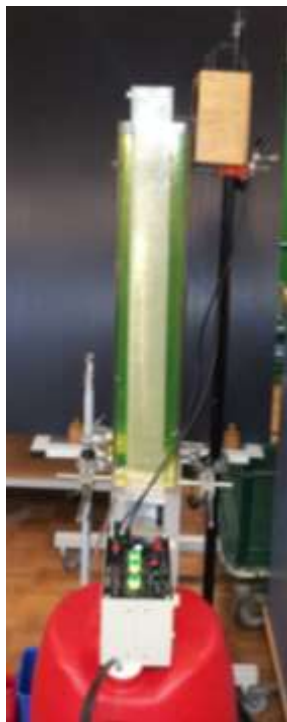


Figure 12 : Schéma et photographie de l'expérience

Observations :

La réponse varie en amplitude (cf. Fig. 13), 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 un des modes de résonance du tuyau coïncide avec la fréquence imposée.

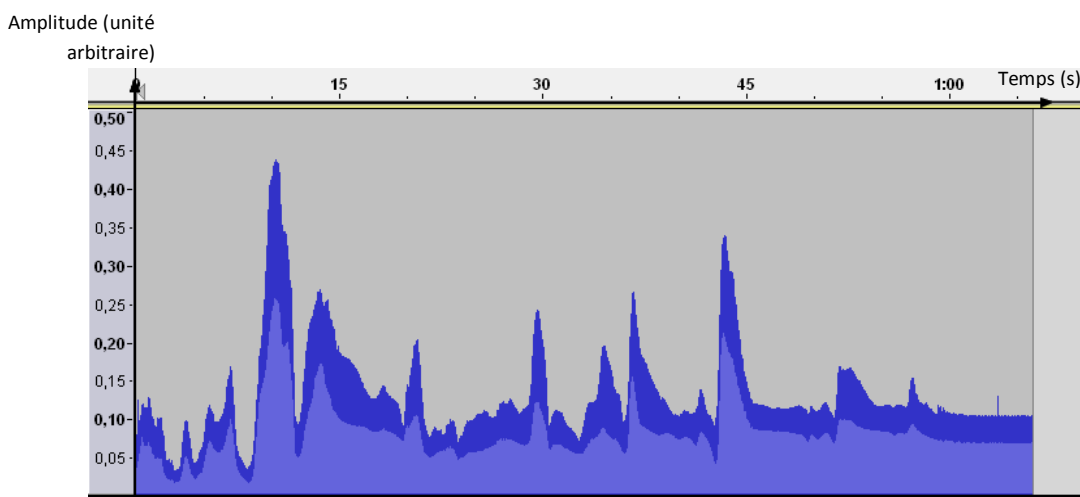


Figure 13 : Réponse en amplitude du conduit excité à 170 Hz

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

Nous avons alors voulu déterminer de quelle façon ces modes de résonance varient en fonction de la hauteur d'eau. Pour ce faire, il faut pouvoir enregistrer la vibration du tuyau lorsqu'il vibre librement, en donnant 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 :

Protocole :

Fixer l'accéléromètre sur la paroi du tuyau d'orgue.

Relier l'accéléromètre à l'ordinateur sur l'entrée micro.

Remplir la cuve en eau tel que le niveau soit de 66 cm.

Frapper l'arrête opposée à la face où est positionné l'accéléromètre, avec une tige métallique. Enregistrer, puis analyser le signal obtenu en traçant le spectre.

Réitérer la manipulation tous les deux centimètres en baissant le niveau d'eau.

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

Pour analyser les vibrations produites par les chocs (cf. Fig. 14), nous avons tracé leur spectre (cf. Fig. 15). Il indique les pics fréquentiels de l'oscillation libre de la paroi

qui correspondent à ses modes de résonance mécanique propres. Nous avons relevé la fréquence de ces pics, puis tracé ces fréquences en fonction du niveau d'eau correspondant (cf. Fig. 16).

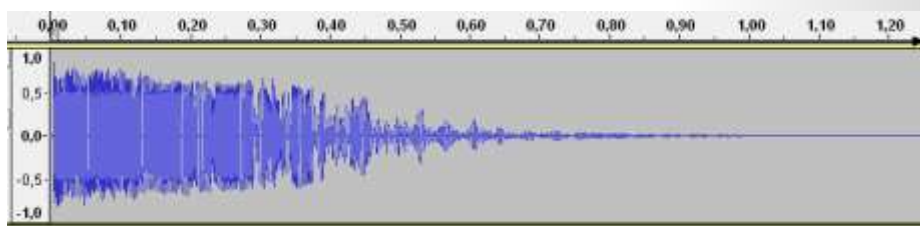


Figure 14 : Enregistrement de la vibration de la paroi après un choc

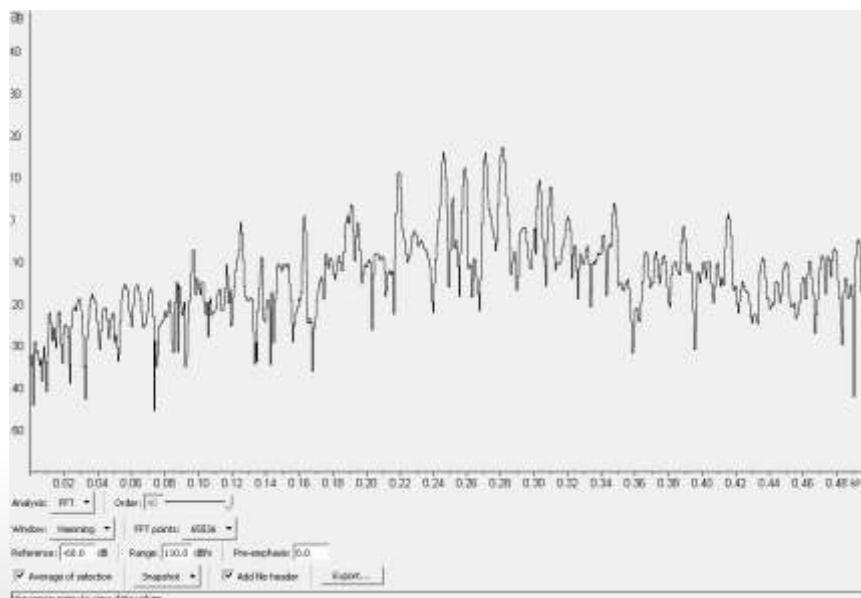


Figure 15 : Spectre de la vibration de la paroi après un choc

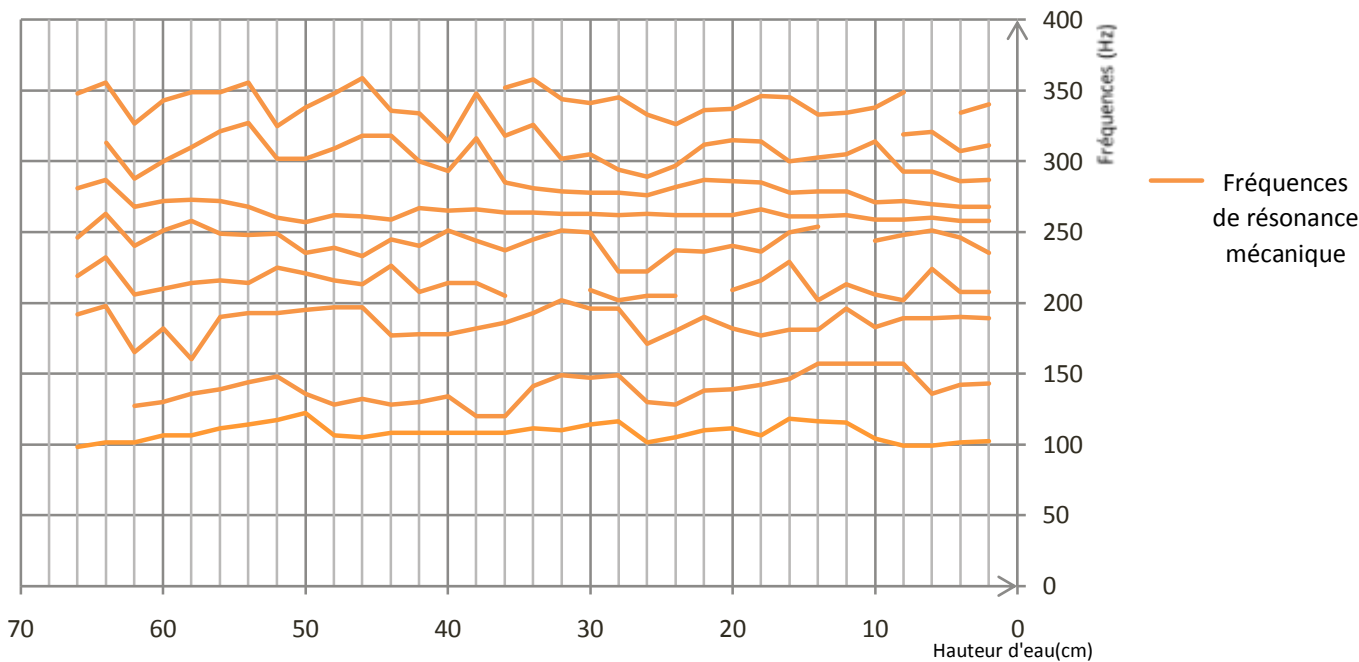
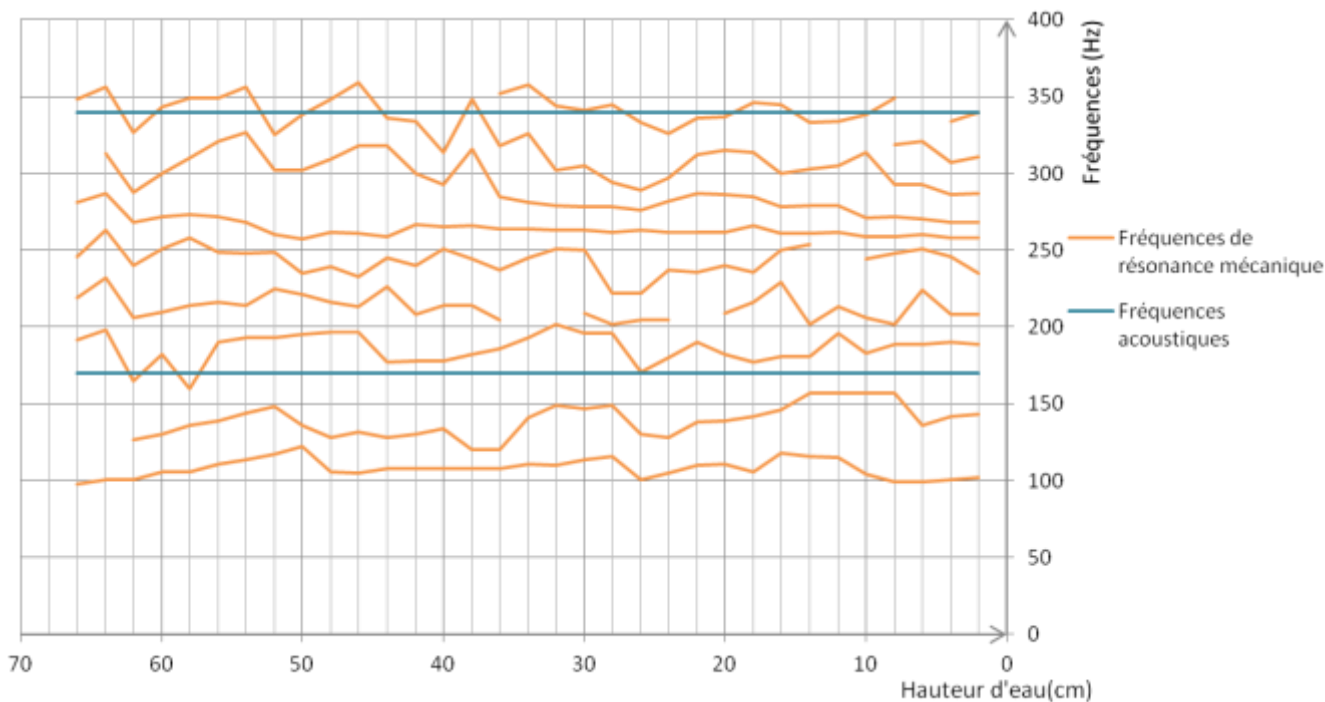


Figure 16 : Graphique des fréquences (ou modes) de résonances mécaniques en fonction de la hauteur d'eau

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. Malgré cela, on peut affirmer que les modes de vibration mécanique du tuyau varient lorsque la hauteur de la colonne d'eau, soit le matériau de façon fictive, change. Cependant, on ne peut pas établir de relation simple entre le niveau d'eau et les fréquences de ces modes.

Si on ajoute sur ce graphique les fréquences acoustiques, les modes de résonance mécanique de la paroi et les fréquences acoustiques sont les mêmes, elles coïncident (cf. Fig. 17).

Ces hauteurs d'eau sont les mêmes auxquelles nous avons précédemment relevé



des sons et Figure 17 : Graphique mettant en évidence les coïncidences fréquentielles

les modes de résonance mécanique de la paroi du tuyau et les fréquences acoustiques de la colonne d'air délimitée par le tuyau.

Si l'on ne peut observer de coïncidence fréquentielle pour tous les niveaux d'eau des sons pathologiques, peut-être est-ce car certaines coïncidences peuvent avoir lieu entre des harmoniques de plus haut rang. Ici, nous n'avons relevé que la fondamentale ainsi que les premières harmoniques.

Récapitulatif :

Au cours de l'expérience de Miller, la colonne d'air délimitée par la paroi du tube, de part les variations de pression, est mise en vibration.

Le spectre d'accélération de la vibration de la paroi a alors la même structure que le celui du signal acoustique. Lorsque la colonne d'eau est pleine, ces fréquences ne correspondent à aucun mode de résonance du tuyau : leur niveau d'intensité sonore est faible. Lorsque le niveau d'eau diminue, les modes de résonance mécanique du tuyau (fréquences auxquelles le conduit va raisonner) changent, et lorsque l'un d'eux s'approche des valeurs des fréquences acoustiques, le tuyau vibre avec plus d'intensité. En effet, à certains niveaux d'eau, les modes de résonance mécanique du tuyau et les fréquences acoustique auxquelles l'air excite le conduit coïncident. Le tuyau a alors une amplitude de vibration plus importante pour ces fréquences.

Comme sa vibration est importante, cette dernière perturbe la vibration de la colonne d'air, et crée ainsi un son pathologique.

IV- Applications industrielles

Nous avons voulu alors appliquer nos travaux de manière pratique. Actuellement nous avons de très nombreuses pistes de développement.

D'abord, ayant pu observer des extinctions du son par couplage vibroacoustique nous avons réfléchi à un projet de silencieux pour système sifflant comme les VMC parfois...

En outre, dans une démarche similaire, nous pourrions travailler sur un contrôle actif du bruit pour les différentes salles en fonction de leurs besoins.

Ensuite, puisque le matériau n'a pas d'influence avec sur le son, nous avons alors cherché à trouver un matériau plus économique, écologique, moins vulnérable aux variations extérieurs et facile à la facture. Pour ce faire, nous avons pris contact avec le LIMATB (Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne).

Enfin, nous travaillons beaucoup en ce moment au développement d'une application pour Smartphones d'aide à la facture instrumentale constituée d'un analyseur de Fourier, d'un module pouvant déterminer les côtes d'un conduit selon la hauteur du son voulu (et réciproquement), et d'une fonction permettant, avant l'installation de conduit d'orgue dans l'édifice instrumentale, de prévoir une situation de pathologie sonore (qui n'est évidemment pas souhaitable). Nous avons dans cet objectif pris contact avec la société angevine d'informatique « Playmoweb », spécialisé dans la mise au point de telles applications.

Conclusion

Ainsi, nous n'avons pu, lors de nos premières observations, observer des différences significatives entre nos différents tubes de bois. Cependant, nous avons déterminé les facteurs d'incertitudes et par cela qu'il n'y a pas d'influence du matériau de la paroi sur le son émis chez les instruments à vent de cette dimension.

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) peut avoir 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, issus de coïncidences fréquentielles entre les fréquences acoustiques et les modes de résonance mécanique. Cependant, ces cas sont extrêmement rares, ils dépendent des dimensions et du matériau du conduit avec des conditions spécifiques, et n'influent pas que sur le timbre, comme nous l'avions pensé au début de nos travaux, mais également sur la hauteur du son.

L'influence de la vibration de la paroi et de son matériau 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 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.

Ces recherches nous ont mené à développer de nombreux projets avec des chercheurs et entreprises en matière d'applications pratiques de ces études.

Annexe 1

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							
Fréquence (Hz)	Niveau (dB)	Niveau (dB)	Niveau (dB)	Niveau (dB)	Niveau (dB)	Niveau (dB)	Niveau (dB)	Niveau (dB)							
586,779785	0	1,12535656	0	1,254957261	0	1,514020215	0	0,985391001	0	0	0	0	0	0	
1173,55957	-41,20440685	2,33420663	-39,1113769	2,038638469	-40,2019551	1,54526391	-39,28061215	1,474101615	1	0	1	0	0	0	
1760,339355	-31,56215685	2,59484581	-28,9171897	2,001948594	-29,8273538	2,18965294	-30,8380853	1,273329736	2	0	0	0	1	0	
2347,119141	-43,11249815	3,02146542	-37,2394123	2,76245315	-37,8256641	2,994834641	-41,37421285	1,468832032	2	2	1	0	2	2	
2936,590576	-33,49319025	3,35459093	-40,6135591	3,407757642	-38,7248352	3,338806805	-39,1183885	2,20874234	2	2	2	0	0	0	
3520,678711	-51,24404795	3,32131584	-52,0040176	2,91855219	-51,9294657	3,065763501	-52,4410209	2,524420636	0	0	0	0	0	0	
4112,841797	-42,84123005	3,29346946	-43,8281113	2,688161356	-44,196685	3,503816584	-48,3350684	3,41092245	0	0	2	0	2	2	
4694,238281	-52,7368329	2,52488393	-51,2255635	2,735918385	-55,1251408	2,532567158	-56,35614725	2,355400169	0	0	2	2	2	0	
5286,401367	-51,53864985	3,6055651	-55,4701705	3,4790455	-63,6568208	4,107114642	-57,20049235	2,928073438	2	2	2	2	0	2	
5867,797852	-68,93461275	2,84428914	-65,2067833	2,067265713	-68,2066732	3,109425847	-67,76283295	2,708827879	2	0	0	1	1	0	
6451,885986	-62,35325255	2,97107054	-66,6516132	1,496654861	-68,2881046	2,522745739	-68,11419215	1,466992319	2	2	2	1	0	0	

Tableau de comparaison aux incertitudes avec les harmoniques égalisées

Annexe 2

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	Inertitude	1	2
Atténuation	69,1	69,1	69,6	69,6	69,3	69,2	0,57059253	60,2	60,2
Chgrt+	51,6	50,3	50,3	51,6	51,0	51,0	50,3	51,6	51,6
Extinction	49,2	49,2	49,2	49,2	49,2	49,2	49,2	49,2	49,2
Battement	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2
Ampli (avec décroissance)	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2
Atténuation	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	0,8794769	43,4	43,4
Chgrt+	41,9	39,5	39,3	41,8	39,7	40,1	39,6	41,9	41,9
Battement	40,6	39	38,7	40,0	39,7	39,7	39,0	40,6	40,6
Extinction	38,2	38	38,1	38,6	38,2	38,2	38,0	38,2	38,2
Battement	38,2	38	38,1	38,6	38,2	38,2	38,0	38,2	38,2
Ampli (avec décroissance)	38,2	38	38,1	38,6	38,2	38,2	38,0	38,2	38,2
Chgrt+	37,3	36,5	36,1	37,7	37,1	37,1	36,6	37,3	37,3
Extinction brève	36,8	36,5	37,4	36,4	37,1	36,6	0,3001634	36,6	36,6
Battement	36,8	36,5	37,4	36,4	37,1	36,6	36,3	36,8	36,8
Ampli (avec décroissance)	36,8	36,5	37,4	36,4	37,1	36,6	36,3	36,8	36,8
Atténuation	34,9	34,3	34,2	34,5	35,1	34,5	34,8	34,9	34,9
Chgrt+	30,9	29,8	28,4	32,3	29,7	31,8	27,9	30,9	30,9
Battement	29,8	28,6	28,4	29,5	28,4	28,9	28,3	29,8	29,8
Ampli (avec décroissance)	29,8	28,6	28,4	29,5	28,4	28,9	28,3	29,8	29,8
Chgrt+	28,2	26,1	27,7	25,8	26,4	28,1	25,8	28,2	28,2
Extinction brève	25,2	26	25,8	29,0	26,4	26,4	29,0	25,2	25,2
Battement	25,2	26	25,8	29,0	26,4	26,4	29,0	25,2	25,2
Ampli (avec décroissance)	25,2	26	25,8	29,0	26,4	26,4	29,0	25,2	25,2
Extinction	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8
Chgrt+	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8
Battement	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8
Ampli (avec décroissance)	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8
Extinction	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9
Battement	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9
Ampli (avec décroissance)	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9
Extinction	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6
Battement	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6
Ampli (avec décroissance)	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6
Atténuation	17,6	17,9	16,8	17,0	16,1	17,7	0,839135	17,2	17,2
Chgrt+	17,6	17,9	16,1	16,7	17,4	17,6	17,2	17,6	17,6
Extinction	17,1	17,9	16,1	16,7	17,4	17,1	17,0	17,1	17,1
Ampli (avec décroissance)	17,1	17,9	16,1	16,7	17,4	17,1	17,0	17,1	17,1
Chgrt+	8,4	11,6	9,0	8,8	9,9	9,3	8,9	8,4	8,4
Battement	7,6	8,1	7,7	8,2	8,2	7,9	7,9	7,6	7,6
Ampli (avec décroissance)	7,6	8,1	7,7	8,2	8,2	7,9	7,9	7,6	7,6
Atténuation	7,6	8,1	7,7	8,2	8,2	7,9	7,9	7,6	7,6
Chgrt+	7,6	8,1	7,7	8,2	8,2	7,9	7,9	7,6	7,6
Battement	7,6	8,1	7,7	8,2	8,2	7,9	7,9	7,6	7,6
Ampli (avec décroissance)	7,6	8,1	7,7	8,2	8,2	7,9	7,9	7,6	7,6

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

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).