

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE LOUIS LUMIÈRE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

SECTION SON / PROMOTION 2018

Sourdine muette pour trompette : vers un
modèle plus adapté

Alphonse ARMANT

DIRECTEUR INTERNE : LAURENT MILLOT

DIRECTEUR EXTERNE : JOËL GILBERT

RAPPORTEUR : ÉRIC URBAIN

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mes directeurs de mémoire Laurent Millot et Joël Gilbert ainsi que le rapporteur du mémoire, Éric Urbain.

Je dois également remercier les enseignants de l'École qui ont participé d'une façon ou d'une autre à ce mémoire de fin d'étude et, en particulier, Mohammed Elliq et Alan Blum.

Mes pensées vont ensuite vers mes camarades de classe qui, pendant ces mois de réflexion et d'écriture, ont su éclairer des zones d'ombre par un débat volontaire et avisé.

Il me reste à remercier mes parents pour leurs relectures, et les gens qui m'entourent au quotidien pour leur soutien et leur présence.

Résumé

La trompette peut produire des niveaux de pression très élevés et il s'avère obligatoire de travailler en respectant les indications de nuances sonores demandées par le compositeur. Or, dans le cadre des habitats collectifs, ce travail ne peut se faire sans utiliser des sourdines dites d'appartement, ou sourdines muettes ou encore sourdines de travail. Mais, si ces sourdines atténuent au maximum le son de la trompette, elles dégradent fortement les sensations de jeu du trompettiste. Le but de ce mémoire consiste donc à proposer un modèle alternatif de sourdine muette qui dégrade moins les sensations du trompettiste en cours de jeu.

Au travers d'une caractérisation objective de différentes sourdines de trompette, grâce à des enregistrements de notes tenues jouées sur la trompette seule ou équipée de sourdine, nous avons justifié l'adoption d'une sourdine muette comme point de départ. Le protocole d'analyse mis en place pourrait d'ailleurs être repris pour l'étude objective d'autres instruments de musique, notamment.

Nous avons testé deux modifications matérielles de la sourdine muette pour n'en retenir qu'une améliorant le confort de jeu. Et, à partir d'enregistrements d'extraits musicaux captés en amont du pavillon, nous avons proposé un protocole de correction d'enregistrements d'extraits musicaux permettant de se rapprocher du son de la trompette sans sourdine, tel qu'entendu en aval du pavillon.

Nous avons étudié les possibilités de réalisation de ces corrections en temps réel et les compromis à adopter s'agissant de la qualité de la correction, compte tenu des solutions disponibles actuellement, comparées à l'écoute des corrections adaptées mais réalisées pour partie en temps différé grâce à un démonstrateur sous Pure Data.

Enfin, puisque la diffusion du signal corrigé se fait au casque, nous avons étudié la possibilité d'une diffusion binaurale, de nature à faire oublier le port d'un casque au musicien, sur la base d'analyses d'enregistrements binauraux pratiqués pour des extraits musicaux joués sans sourdine. Nous avons ainsi mis en évidence le besoin urgent d'une solution de filtrage en temps réel avec des filtres à réponses impulsionnelles très longues obtenus par convolution du filtre de correction et du jeu de filtres permettant une écoute binaurale satisfaisante pour le musicien.

Mots-clés : sourdine, trompette, mesure acoustique, correction sonore, caractérisation objective.

Abstract

Following the composer's musical intentions, a trumpeter can produce very high pressure levels with his instrument. He must be able to rehearse and work on a piece playing as the composer wanted him to play. In some cases it can cause trouble to the people around, specifically in shared buildings. In this case trumpeters can use practice mutes to work for instance in their flat. These mutes's only purpose is to reduce the global sound level of the trumpet, but doing so they also alters the trumpeter's playing sensations. This work aims at offering an alternate model of practice mute which would respect more the trumpeter's sensations.

In this work we characterize several models of trumpet mutes by analysing the recordings of a trumpet equipped with various mutes. This analysis led us to use an already existing practice mute as a starting point for the alternate model. The experimentation protocol we designed may be used to conduct the study of others musical instruments.

We experimented two modifications on the commercial model. In the end only one was considered as satisfying and thus kept. Then, we recorded the sound of the muted trumpet upstream of the bell and we designed a protocol for processing this sound before returning it to the player through headphones. This processing aims at returning the most realistic trumpet sound.

We studied different possibilities for the realization of this processing in real-time. The technologies available nowadays imposes some compromises about the correction's quality in real time. To avoid these compromises we studied the possibility of implementing the correction in differed time, in PureData for exemple.

Finally, as the trumpeter will hear his trumpet through headphones we followed the idea of a binaural restitution based on binaural recordings of a trumpeter playing several music extracts on his trumpet. We demonstrated here the need of a real-time processing using long impulse responses to convolve a satisfying binaural filters set.

Key-words : mute, trumpet, acoustic measure, sound correction, objective characterization.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iv
Introduction générale	1
1 La trompette et ses sourdines	3
1.1 Histoire de la trompette	3
1.2 Constitution de la trompette moderne et fonctionnement	8
1.3 Sourdines	12
1.4 Conclusions locales	19
2 Caractérisation des sourdines de trompette et conception d'un modèle alternatif	20
2.1 Eléments de physique pour le couple trompette/sourdine	21
2.1.1 Le pavillon	21
2.1.2 Sons cuivrés et ondes de choc	23
2.1.3 Sourdines intra ou extra pavillonnaires	26
2.2 Protocole de mesure et d'analyse	28
2.2.1 Procotole et matériel de mesure	28
2.2.2 Principes d'analyse utilisés	33
2.3 Résultats pour la caractérisation objective des sourdines	41
2.3.1 Sourdine sèche	42
2.3.2 Sourdine Wah avec tube	45
2.3.3 Sourdine Wah sans tube	47
2.3.4 Sourdine bol avec bol enfoncé	49
2.3.5 Sourdine bol avec bol ressorti	52
2.3.6 Sourdine muette	54
2.3.7 Sourdine Velvet	56
2.3.8 Sourdine Plunger	60
2.4 Conception d'un modèle alternatif	63
2.4.1 Cahier des charges	63
2.4.2 Fabrication	64

2.4.3	Caractérisation du modèle alternatif de sourdine	67
2.5	Conclusions locales	72
3	Restitution du son au trompettiste	73
3.1	Utilisation du capteur interne et tracé du profil IDS du son en amont du pavillon	74
3.2	Re-synthèse d'un son de trompette ouverte	76
3.2.1	Caractérisation	76
3.2.2	Principes d'implémentation pour les traitements	80
3.3	Re-synthèse d'un son de trompette à partir de mesures binaurales .	82
3.4	Conclusions locales	84
	Conclusion générale	85
	Bibliographie / Œuvres citées	90
	Annexes	91
A	Ondes stationnaires dans un cylindre à une extrémité fermée	92
B	Modélisation physique de la trompette et outils associés	95
B.1	Précisions sur les notions d'impédances acoustiques	96
B.1.1	Impédance et admittance caractéristiques	96
B.1.2	Impédance acoustique locale	98
B.2	Description spatio-fréquentielle et matrice de transmission	102
B.2.1	Principes	102
B.2.2	Modélisation spatio-fréquentielle des éléments de la trompette	102
B.3	Modèle physique des lèvres	105
	Table des Figures	110
	Liste des Tables	111

Introduction générale

C'est parmi les instruments à vents que l'on trouve la famille des cuivres. Contrairement à ce que le nom peut laisser croire tous ne sont pas faits de cuivres mais tous produisent le son par la vibration des lèvres au creux d'une embouchure.

On peut citer le cor d'harmonie, le tuba, le trombone, la trompette mais aussi le didgeridoo, en bois, ou le cornet à bouquin, en corne.

Le timbre de certains instruments en cuivre peut être modifié par des sourdines. La trompette et le trombone en particulier offrent aux instrumentistes et compositeurs une grande variété de sourdines et donc de timbres. Le siècle dernier, avec ses avancées technologiques et industrielles, a vu apparaître conjointement des styles musicaux et de nouvelles sourdines.

La trompette est de plus un instrument produisant des niveaux de pression sonore élevés. Au-delà de la modification du timbre, l'adjonction d'une sourdine à une trompette peut dans certains cas atténuer ces niveaux de pression quand c'est nécessaire. Les sourdines d'appartement, ou sourdines muettes, ont en effet pour seul but d'atténuer le son de l'instrument afin de pouvoir pratiquer l'instrument sans gêner quiconque.

Les problèmes sont alors multiples : comment réduire au maximum le niveau sans gêner le jeu du musicien ? Quel niveau maximum peut-on tolérer ? Peut-on conserver la justesse de l'instrument tout en bouchant le pavillon ? Comment capter le son de l'instrument en amont du pavillon ? Quels traitements appliquer à ce signal ?

Dans le premier chapitre je présente tout d'abord la trompette et son histoire. Ensuite j'explique son fonctionnement et les phénomènes physiques liés à son fonctionnement. La fin du premier chapitre est dédié à la présentation des différents modèles de sourdine pour trompette existants aujourd'hui.

Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation objective de ces différents modèles de sourdines en partant de mesures. J'étudie dans ce chapitre huit configurations différentes de trompette bouchée en analysant, à l'aide d'outils d'analyse IDS, l'effet de chaque sourdine ou configuration de sourdine sur la balance spectrale de la trompette. Cette étude est suivie de la conception d'un modèle alternatif de sourdine muette ayant pour point de départ un modèle de sourdine du commerce. Les modifications apportées au modèle du commerce ont pour but d'améliorer la jouabilité de la trompette bouchée, et ont été déduites de ce que l'étude des sourdines existantes aura apportée.

Le troisième chapitre traite quand à lui du traitement appliqué au signal capté dans le pavillon bouché avant restitution au trompettiste. Le modèle de sourdine alternatif est en effet équipé d'un capteur de pression qui donne accès au son de la trompette bouchée en amont du pavillon. L'étude de ce signal a démontré que le son prélevé en amont du pavillon avait une balance spectrale très différente du son de la trompette débouchée. Un processus de re-synthèse est donc mis au point dans la suite du troisième chapitre pour offrir à l'instrumentiste un son au plus proche du son de la trompette débouchée. Finalement ce chapitre se clos sur l'étude d'une restitution d'un son binauralisé pour proposer au trompettiste un rendu le plus réaliste possible en se rapprochant de ce que lui entend lorsqu'il joue.

Chapitre 1

La trompette et ses sourdines

Ce chapitre a pour objet l'histoire de la trompette, instrument millénaire qui a beaucoup évolué au cours du temps. Il traite ensuite de la constitution de la trompette moderne et de son fonctionnement. Il liste finalement non exhaustivement les différents types de sourdines utilisées par les compositeurs et interprètes d'aujourd'hui.

1.1 Histoire de la trompette

La trompette est un instrument de la famille des cuivres, le plus souvent fait de cuivre ou de laiton et dont les plus vieux ancêtres servaient à faire entendre des signaux pendant les chasses ou les batailles. Ses origines remontent à l'Égypte Ancienne ; elle est à l'époque faite de corne (cf. Figure 1).



FIGURE 1 – Défense d'éléphant taillée, utilisée pour le signalement.

À partir du XIV^{ème} siècle le potentiel musical de la trompette émerge ; elle est alors faite en cuivre mais dépourvue de piston (cf. Figure 2), on ne peut faire sonner que la note correspondant à la fréquence fondamentale de l'instrument et ses harmoniques. On appelle aujourd'hui cet instrument trompette naturelle, les partitions de l'époque y faisant référence par le terme clarino. On peut l'entendre

alors jouer des toccatas, sonates, et sonneries notamment pendant les cérémonies militaires [1].



FIGURE 2 – Trompette naturelle militaire aux couleurs du Royaume-Uni.

Elle est introduite dans l'orchestre au cours du XVIIème siècle et l'on commence alors à fabriquer des trompettes dans toutes les tonalités, pour s'adapter aux différentes œuvres.

Les Allemands excellent dans la facture de trompette naturelle. La période baroque (1600-1750) est considérée comme l'âge d'or de la trompette naturelle, avec un répertoire fourni des plus grands compositeurs de l'époque (Vivaldi, Concerto pour deux trompettes [2], Scarlatti, Concerto grosso [3] et de nombreux choraux ou cantates de Bach entre autres).

La trompette naturelle est alors amenée à doubler les parties de soprano et donc jouer les mélodies. Il devient alors très handicapant de ne pouvoir faire sonner avec une trompette naturelle que les harmoniques du fondamental : il manque beaucoup de notes. Un dispositif rudimentaire est inventé pour permettre au musicien de jouer les demi-tons : une petite coulisse mobile [1].

C'est le nom Tromba da tirarsi (cf. Figure 3) en italien qui fait aujourd'hui référence pour cet instrument. J-S Bach en fait notamment mention dans ses cantates no 5, 20, 46 et 77 [4, 5, 6, 7]. On trouve également le nom allemand Zugtrompete, mais il peut aussi faire référence à un modèle de trompette à coulisse moderne.

La petite coulisse ne permet toujours pas de produire toutes les notes de la gamme. Après la période baroque cet instrument tombe dans l'oubli jusqu'à la fin du XXème siècle. Pendant de nombreuses années la confusion régnait quand à la nature de cette trompette baroque, certains musicologues allant jusqu'à affirmer que

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

la mention Tromba da tirarsi faisait référence au trombone plutôt qu'à la trompette [8].



FIGURE 3 – Reproduction actuelle d'une tromba di tirarsi.

Les trompettistes développent ensuite une technique pour boucher le pavillon et monter alors la note d'un demi-ton, mais cela nécessite l'apprentissage d'une nouvelle technique de jeu et surtout un modèle de trompette particulier pourvu d'un pavillon courbé vers l'arrière, en demi-lune [1].



FIGURE 4 – Bugle à clefs, des années 1830.

Dans la deuxième moitié du XVIIIème siècle le trompettiste viennois Anton Weidinger développe une trompette équipée de cinq clefs comme celles des clarinettes (cf. Figure 4). Il peut alors jouer toute la gamme chromatique, avec une virtuosité inatteignable avec les tromba di tirarsi. Hummel ou Haydn écrivent des concertos pour cette trompette dont par exemple le fameux concerto pour trompette en mi bémol majeur de Haydn [9], concerto de Haydn parmi les plus populaires et pièce jouée aujourd'hui par de nombreux trompettistes avec des trompettes modernes [10].

Les changements majeurs pour la trompette arrivent finalement aux XIX^{ème} et XX^{ème} siècles. Les pistons sont introduits en 1814 par l'allemand Heinrich Stölzel, sous le nom de piston Stölzel. Le défaut principal de ce piston est qu'il introduit un angle de quatre-vingt-dix degrés pour la colonne d'air. Aussi, lorsqu'il active ce piston, le trompettiste peut donc s'attendre à un retour de pression dans ces lèvres dus aux perturbations dans l'écoulement de l'air dans la trompette.

Pendant les trois décennies qui vont suivre de nombreux luthiers comme l'autrichien Joseph Riedl ou l'allemand C. F. Sattler vont tenter de résoudre les problèmes liés au piston Stölzel. C'est finalement le luthier parisien François Périnet qui donnera son nom au piston Périnet (cf. Figure 5), qui impose sa solution avec un brevet déposé en 1839 [11].



FIGURE 5 – Anatomie d'un piston Périnet (Guillaume Piolle / CC BY 3.0).

Après quelques années d'ajustement les trompettes sont finalement dotées de trois pistons qui permettent alors la production de toute la gamme chromatique à l'instrument (cf. Figure 6). Dans le monde entier la trompette en si bémol s'impose, ainsi que la trompette en do dans les orchestres.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

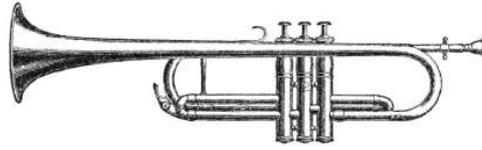


FIGURE 6 – Trompette à piston de la du fin XIXème siècle.

L'appellation trompette en si bémol fait référence au fondamental de la trompette. C'est un si bémol 3, de fréquence 233,082 Hz, donc quand l'instrumentiste verra écrit un do sur sa partition il jouera tous les pistons levés et fera sonner en réalité un si bémol. On dit de la trompette en si bémol que c'est un instrument transpositeur, comme la clarinette en si bémol ou le cor d'harmonie en fa.

La trompette en do, appelée trompette en ut dans le langage courant, a pour fondamental le do. Le trompettiste qui joue un do fait donc réellement entendre un do. Ce n'est pas un instrument transpositeur. Elle est aujourd'hui encore courante dans les orchestres symphoniques en France mais c'est une particularité de l'école française : on la trouve bien plus rarement dans les autres pays.

Il existe également des trompettes en ré, ainsi qu'en mi bémol et en fa, mais ces instruments restent très peu joués.

Ces nouvelles trompettes développent un son plus fort, plus brillant et sont plus faciles à jouer. La trompette à coulisse n'a cependant jamais été abandonnée et continue aujourd'hui à être jouée, tout comme la trompette naturelle qui reste un instrument à part entière avec un enseignement séparé dans les conservatoires.

1.2 Constitution de la trompette moderne et fonctionnement

La trompette est faite d'un tube d'un alliage cuivre/laiton cylindrique d'un mètre quarante enroulé sur lui-même et entrecoupé en son milieu de trois pistons Périnet auxquels sont adjointes trois petites coulisses. Une des extrémités du tube s'adapte aux lèvres grâce à une pièce appelée embouchure (cf. Figure 7), l'autre est évasée et s'appelle pavillon (cf. Figure 8).

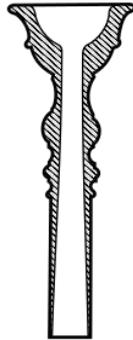


FIGURE 7 – Vue en coupe d'une embouchure. Les lèvres se posent sur le haut. Le contact lèvres-embouchure doit être étanche.

Le premier piston lorsqu'il est enfoncé allonge le tube d'une longueur équivalente à un demi-ton, le deuxième d'une longueur équivalente à un ton entier et, le troisième, d'une longueur équivalente à un ton et demi. Les différentes combinaisons d'enfoncement des pistons permettent donc de balayer jusqu'à trois tons. Comme trois tons et demi correspondent à une quinte, et donc à une harmonique du tube, on n'a pas besoin de piston supplémentaire pour la générer. Ainsi, avec les trois pistons, on est en mesure de produire toutes les notes de la gamme chromatique sur une trompette.



FIGURE 8 – Trompette en Si bémol Yamaha 8335 (Yamaha Corporation).

Ainsi, un premier modèle physique simple pour la trompette pourrait être constitué d'un guide d'onde avec une source de pression à un bout et un pavillon à l'autre.

Les différences de tessiture viennent de la longueur du tube vibrant qui constitue le corps de l'instrument. Plus il est long, plus l'instrument aura un fondamental grave et donc une tessiture grave.

Le timbre lui dépend principalement de la perce de l'instrument, c'est-à-dire de la forme du tube déroulé et du pavillon.

Les perces des cuivres peuvent être grossièrement séparées en trois groupes :

- cylindrique, comme la trompette ou le trombone ;
- conique, comme le bugle ou le tuba ;
- hybride comme le cor d'harmonie ou le cornet.

Ce classement peut être discuté dans la mesure où les instruments modernes comme le bugle ou le tuba sont dotés de pistons auxquels sont adjoints une longueur de tube cylindrique qui, lorsque tous les pistons sont abaissés, n'est pas négligeable comparée à la longueur du tube conique. Par exemple, si on additionne les longueurs des coulisses des trois pistons du bugle, on trouve 54,8 cm pour un tube conique de 110 cm... En réalité, tous les instruments à perce conique et à pistons sont des hybrides. Un bugle naturel en revanche, serait purement conique.

À partir du tube cylindrique constituant le corps de la trompette, avec son embouchure, on peut déterminer l'impédance d'entrée de l'instrument, qui est le rapport des transformées de Fourier de l'amplitude de la pression acoustique sur l'amplitude du débit acoustique (cf. Annexe B). Le tracé du module de l'impédance met en évidence des pics correspondant aux fréquences de résonance, pour lesquelles le module de l'impédance est maximal (cf. Figure 9).

Pour un doigté donné, ces fréquences correspondent aux notes, ou partiels, que le trompettiste pourra faire sonner. Pour une trompette en si bémol, le tracé du module de l'impédance d'entrée du tube à vide (aucun piston enclenché) met en évidence des pics aux fréquences des notes si bémol₂, si bémol₃, fa₄, si bémol₄, ré₅, fa₅ etc. soit la série harmonique associée au si bémol. Pour un résonateur cylindrique de longueur L fermé à une extrémité et ouvert à l'autre, la série des fréquences harmoniques est théoriquement donnée par la formule :

$$f_n = \frac{(2n - 1)c_0}{4L}, \quad (1)$$

Où n est un entier supérieur à 1 et c_0 la célérité du son dans l'air. Le détail du calcul est reproduit en Annexe A.

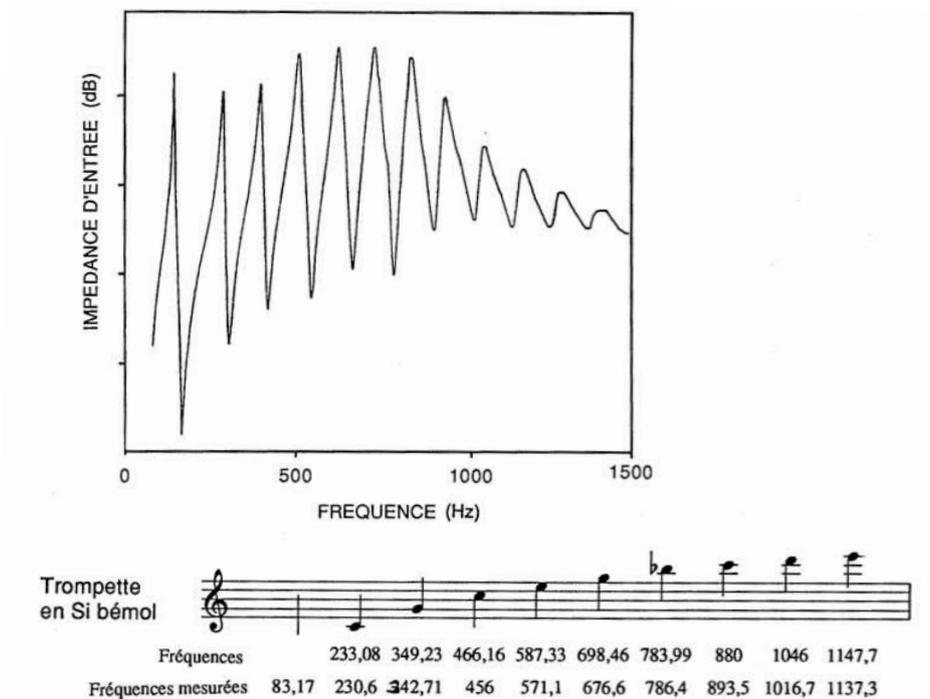


FIGURE 9 – Module de l'impédance d'entrée d'une trompette en si bémol et fréquences des pics mesurés, d'après Caussé et Sluchin [12] p.24.

On voit qu'un tel résonateur seul conduit à la production d'une série incomplète d'harmoniques vu qu'il manque les harmoniques paires. *A contrario*, un résonateur conique permet la production de toutes les harmoniques. Ainsi, le rôle du pavillon de la trompette, qui correspond en réalité plus ou moins à une portion de cône tronqué que l'on insère au bout du résonateur cylindrique [12], sert donc à générer les harmoniques paires manquantes.

Le pavillon joue un autre rôle fondamental dans la genèse du son de la trompette. Il est censé adapter l'impédance du corps vibrant au milieu ambiant pour permettre le rayonnement du son dans ce dernier. Nous reviendrons sur ce phénomène plus loin car il est fondamental s'agissant de la question des sourdines [12].

Le timbre dépend aussi de nombreux paramètres intrinsèques propres au métal dont est fait la trompette ainsi qu'au vernis utilisé pour vernir la trompette. En effet, bien que l'instrumentiste sente son instrument vibrer quand il joue, le son est communiqué à l'extérieur de l'instrument par rayonnement à l'extrémité du tube et non par vibration d'une surface annexe, celle de la table d'harmonie, comme c'est le cas pour les cordes par exemple. L'état de surface et la porosité des parois intérieures de l'instrument constituent donc un facteur non négligeable dans la propagation de

l'onde acoustique dans l'instrument, ce qui explique en partie le vieillissement dont les cuivres sont victimes, contrairement aux bois qui ont tendance à se bonifier avec l'âge.

En repartant de l'équation (1), on constate que la célérité du son intervient comme facteur or elle dépend elle même de la racine carrée de la température. C'est pourquoi la température de l'instrument joue un rôle dans sa justesse et donc que tout cuivriste est au fait qu'il doit 'chauffer' son instrument avant de jouer.

Pour approfondir l'étude du fonctionnement des cuivres ainsi que le modèle de la trompette on peut y rajouter la cavité buccale et les lèvres du trompettiste qui ont leur propre impédance. Et, on peut alors essayer de faire émerger une modélisation par une impédance acoustique ramenée d'autant plus complexe que l'on cherche à raffiner la description de l'embouchure, de la perce et du pavillon (cf. Annexe B et section 2.1)

1.3 Sourdines

Les premières mentions de sourdine datent du XVII^{ème} siècle. Dans l'opéra Orfeo de Monteverdi [13] en particulier il est noté 'trombe sordine' pour signifier que les trompettes doivent jouer bouchées. Mersenne dans son "Harmonie Universelle" [14] présente un modèle de sourdine pour trompette. La figure de Mersenne (cf. Figure 10) donne peu d'information sur la constitution de ladite sourdine mais on sait que la pièce de bois était percée d'un cylindre creux en son milieu sur toute la longueur. Voici ce qu'il en dit :

'...la sourdine, qui est ordinairement faite d'un morceau de bois, que l'on met dans le pavillon de la trompette, afin qu'elle la bouche tellement qu'elle en diminue et en assourdisse les sons.

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$, montrent le côté que l'on pousse dedans, et ζ, η signifient l'autre bout, par lequel on la tient en la poussant dedans ledit pavillon...

...il est difficile de savoir de combien la sourdine diminue le son, car l'on peut seulement dire qu'il est d'autant plus faible qu'il s'entend de moins loin...

Or il faut remarquer que cette sourdine est percée tout au long depuis la bouche α jusqu'à la patte ζ, η '

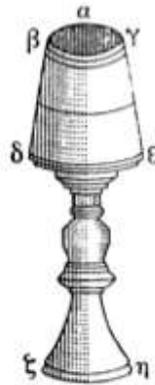


FIGURE 10 – représentation de la sourdine d'après l'Harmonie Universelle de Mersenne [14].

Les sourdines étaient également utilisées à l'époque sur les trompettes militaires pour atténuer certains signaux dans le but d'empêcher l'ennemi de les entendre.

Par la suite Beethoven [15] ou Debussy utilisent fréquemment les sons bouchés des trompettes et cors dans leurs œuvres [16]. Les modèles varient déjà à l'époque et il est aujourd'hui parfois difficile d'interpréter la volonté du compositeur quand il ne précise pas quel type de sourdine il faut utiliser.

L'avènement du jazz au XXème siècle ouvre la porte aux expérimentations sonores et à la recherche de nouveaux timbres. Les technologies et techniques d'alors permettent la facture de nouveaux modèles de sourdines que nous détaillons plus loin.

On peut différencier deux catégories de sourdines :

- les sourdines fixées à l'intérieur du pavillon, généralement grâce à des lames de liège ;
- et les sourdines placées devant le pavillon, tenues à la main ou fixées par divers systèmes.

Leur rôle acoustique est différent, l'effet que chaque catégorie a sur le son l'est sensiblement aussi.

Dans la première catégorie on trouve les sourdines sèches (cf. Figure 11), ou *straight mute* en anglais. Ce sont les plus courantes : lorsqu'une partition fait mention seulement de "avec sourdine" c'est la sourdine sèche qui est utilisée. Une grande variété de modèles différents existe : la sourdine peut être en bois, en métal ou en plastique, avec une forme droite ou plus évasée. L'extrémité la plus étroite est ouverte, le fond le plus large est fermé. Elle se fixe dans le pavillon à l'aide de lames de liège.



FIGURE 11 – Sourdine sèche.

On peut citer aussi la sourdine wah-wah (cf. Figure 12). Elle est faite de deux pièces : un bol creux percé d'un trou dans lequel coulisse un tube de métal au bout évasé. L'effet de la sourdine dépend de la position du tube : complètement rentré, à moitié rentré ou complètement retiré. On peut trouver différentes dénominations pour cette sourdine, faisant parfois référence à la position du tube, mais sans consensus : wah, harmon, bubble... Le tube se traduit par 'stem' en anglais et il peut être annoté sur la partition 'with stem' (avec tube) ou 'without stem' (sans tube) pour clarifier la volonté du compositeur, mais ce n'est pas systématique. On peut également moduler l'effet en bouchant plus ou moins le tube avec la main, ce qui lui a donné son nom 'wah-wah'.



FIGURE 12 – Sourdine wah-wah.

Elle fait son apparition dans 'Rhapsody In Blue' de Gershwin en 1924 [i][7].

La sourdine Solotone (cf. Figure 13) ou méga vient également du jazz de cette époque. Elle se fixe dans le pavillon toujours à l'aide de lames de liège et est conçue de façon assez proche de la wah-wah. Elle est en effet faite d'une cavité traversée par un tube d'où sort l'air mais la cavité est conique et le tube n'est pas mobile.

Le son de la sourdine Solotone est caractéristique du jazz du début du XXème siècle.

Finalement les sourdines muettes (cf. Figure 14), ou silencieuses, ou d'appartement entrent aussi dans cette catégorie puisqu'elles se fixent dans le pavillon à l'aide d'un cylindre de liège qui stoppe en grande partie la propagation du son vers le pavillon. Elles ressemblent pour la plupart à une sourdine Solotone dont

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté



FIGURE 13 – Sourdine Solotone.

aurait bouché le fond. Certains modèles contiennent des matériaux absorbants ou des chicanes acoustiques.



FIGURE 14 – Sourdine muette Yamaha PM7x, utilisée dans l'étude. L'intérieur est creux. On voit sur le fond la prise jack reliée au capteur et le petit évent qui permet à l'air de s'échapper. On voit le cylindre de mousse enroulé autour du corps de la sourdine qui freine la propagation des ondes vers le pavillon.

Dans la deuxième catégorie on trouve les sourdines Plunger (cf. Figure 15). Ce sont à l'origine des déboucheurs à ventouse de toilettes dont on a enlevé le manche et que l'on tient devant le pavillon. Les modèles commerciaux sont en bois, en métal ou en plastique et ont la partie intérieure recouverte de matériaux absorbants comme du tissu ou du velours. La particularité de cette sourdine est qu'elle requiert une des mains du trompettiste pour la tenir.

Elle demande donc un certain entraînement pour être jouée mais cette liberté permet de moduler l'effet en bouchant plus ou moins le pavillon. De plus elle est très rapide à mettre en place, ce qui peut être indispensable dans certaines œuvres.



FIGURE 15 – Sourdine plunger.

La sourdine Derby est proche de la Plunger. C'est à l'origine un chapeau de feutre que le trompettiste tient devant la pavillon. De rares versions commerciales existent, elles sont faites de métal et tapissées de feutre ou de velours à l'intérieur.

La sourdine Velvet (cf. Figure 16) ou bucket est elle fixée devant le pavillon. En forme de seau, d'où son nom bucket (seau en anglais), en plastique ou en métal elle est généralement remplie de matériaux absorbants légers comme du coton.



FIGURE 16 – Sourdine Velvet.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

La sourdine bol (cf. Figure 17) est l'association d'une sourdine sèche avec une sourdine Plunger, elle mélange les deux catégories. Le bol est la plupart du temps mobile, il peut coulisser sur le corps de la sourdine sèche pour modifier l'effet donné par la sourdine.



FIGURE 17 – Sourdine bol.

On peut également citer la trompette à écho qui est un modèle de trompette à deux pavillons. L'un est un pavillon normal, l'autre un pavillon bouché. On fait sonner soit l'un soit l'autre à l'aide d'un quatrième piston. Le pavillon bouché se rapproche du son d'une sourdine wah-wah sans le tube. Très populaire dans les années 20 la mode s'est perdue et les trompettes à écho ne sont presque plus fabriquées aujourd'hui.

La Figure 18 expose de manière synthétique, grâce à une coupe longitudinale des sourdines, les différences entre les trois modèles de sourdines les plus répandus : sèche, bol et wah-wah.

Pour les cuivres les notions de volume et de timbre sont indissociables. Le timbre dépend du volume. Les nuances indiquées par les compositeurs en tiennent compte. Une trompette qui joue piano ne sonnera pas comme une trompette jouant forte. On comprend alors que les sourdines agissent sur les deux simultanément, leur effet est double [12].

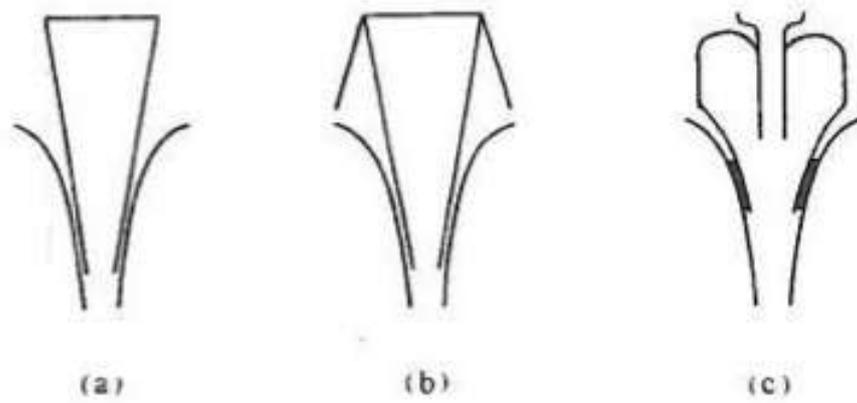


FIGURE 18 – Vue en coupe de trois types de sourdine : sèche (a), bol (b) et wah-wah (c). D'après Vernier et Gasteau p.5 [17].

1.4 Conclusions locales

Dans ce chapitre, j'ai proposé un résumé de l'histoire de la construction de la trompette, qui est fortement liée aux évolutions de son utilisation par les compositeurs ainsi qu'aux styles musicaux en vigueur au travers des époques.

J'ai ensuite donné une première explication du fonctionnement de la trompette et des phénomènes physiques à l'œuvre quand le trompettiste en joue.

J'ai conclu ce chapitre par une présentation non exhaustive des sourdines existant pour la trompette avec, pour chacune d'entre elles, une description rapide de leur constitution physique et du son obtenu en les utilisant avec une trompette.

Le chapitre suivant est dédié à la question de la caractérisation objective des sourdines réunies pendant le mémoire et, partant de cette caractérisation, à la proposition d'un modèle de sourdine alternative permettant de satisfaire le cahier des charges : atténuer le son émis par la trompette suffisamment mais en garantissant un confort (facilité) de jeu suffisant.

Chapitre 2

Caractérisation des sourdines de trompette et conception d'un modèle alternatif

Dans ce chapitre, je commence par présenter un complément sur les phénomènes à l'œuvre lors du "cuivrage" et quand on joue avec une sourdine introduite dans le pavillon.

Dans un deuxième temps, je présente l'étude de caractérisation objective des sourdines à partir des mesures obtenues en jouant des notes tenues avec ou sans sourdine, et, je me sers des résultats de cette caractérisation pour rassembler des informations en vue de proposer un modèle alternatif de sourdine muette.

La troisième partie du chapitre est dédiée à la réflexion et aux choix ayant mené à la proposition d'un modèle alternatif de sourdine muette.

2.1 Eléments de physique pour le couple trompette/sourdine

Cette section vise à apporter des explications complémentaires sur la physique de la trompette et sur les phénomènes physiques en jeu lorsqu'une sourdine est insérée dans le pavillon.

2.1.1 Le pavillon

Intéressons-nous de plus près au rôle du pavillon dans la genèse du son de la trompette.

Comme dit précédemment le pavillon participe à la transmission de l'onde au "milieu ambiant", c'est-à-dire à la diffusion du son de la trompette à l'extérieur de celle-ci. En effet, lorsque l'onde se propage dans des zones où l'impédance acoustique locale change de manière sensible, elle subit des réflexions et des transmissions successives qui se traduisent par le constat qu'une partie seulement de l'onde initiale est transmise à l'extérieur de la trompette, l'autre partie étant réfléchie vers l'intérieur.

On peut considérer $R(f)$ et $T(f)$ les coefficients fréquentiels respectivement de réflexion et de transmission, tels que $R(f) + T(f) = 1$, pour caractériser précisément les parties réfléchie et transmise de l'onde incidente. Et, comme on constate que plus le changement d'impédance acoustique locale est abrupt, plus l'onde est réfléchie, on a ajouté à la trompette un pavillon dont on cherche à optimiser le profil pour favoriser une transmission suffisante vers l'extérieur, sans trop perturber le confort de jeu.

En considérant un pavillon comme une succession de portions de cylindre de longueurs infinitésimales, après intégration sur l'espace et le temps (d'après J. Gilbert, [12] Annexe B), et en supposant l'onde unidimensionnelle et non-tourbillonnaire, on aboutit à l'équation du pavillon suivante :

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} + \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

avec

- p : la pression ;
- c_0 : la célérité du son dans l'air ;
- S la section variable, dépendant de x .

L'équation (2), dite équation de Webster, a des solutions algébriques pour quelques cas particuliers, notamment celui du pavillon exponentiel, cas dans lequel nous nous plaçons.

Pour un pavillon exponentiel, le rayon local à la distance x par rapport à l'entrée du pavillon est défini par :

$$R(x) = R_1 e^{mx}, \quad (3)$$

où m est un paramètre du pavillon défini en fonction de R_1 et R_2 les rayons d'entrée et de sortie du pavillon grâce à la relation :

$$m = \frac{1}{L} \log\left(\frac{R_2}{R_1}\right), \quad (4)$$

où L correspond à la longueur du pavillon.

On démontre que le pavillon exponentiel est le pavillon qui a le coefficient de transmission le plus élevé (cf. Annexe 2). Et, quand f tend vers l'infini, on constate que $T(f)$ tend vers 1.

Ce coefficient de transmission est valable pour des fréquences au-dessus d'une certaine fréquence de coupure f_c . En effet le pavillon a comme on l'a dit pour rôle d'adapter la haute impédance de l'intérieur du tube à la faible impédance de l'air libre. Il le fait en modifiant l'impédance du tube graduellement grâce à sa forme exponentielle, mais, pour les basses fréquences dont les longueurs d'onde sont plus grandes que la longueur du pavillon, cet effet ne fonctionne pas. Ainsi, les basses fréquences rencontrent un changement d'impédance abrupt puisqu'elles ne "voient" pas le pavillon et elles sont donc réfléchies dans la trompette.

En théorie, la transmission des hautes fréquence est parfaite ($T(f) = 1$) pour un pavillon exponentiel, mais, pour les fréquences en deçà de la fréquence de coupure f_c , le coefficient de transmission $T(f)$ est potentiellement nul et ces ondes ne sont pas transmises par le pavillon à l'extérieur de la trompette.

On montre [6] que la fréquence de coupure f_c est donnée par la relation suivante :

$$f_c = \frac{mc_0}{2\pi L}, \quad (5)$$

donc qu'elle est inversement proportionnelle à la longueur L du pavillon.

Dans la réalité, comme le pavillon n'est évidemment pas infini, la fréquence de coupure f_c n'est pas nulle : elle est même d'autant plus haute en fréquence que le pavillon est court.

Comme les imperfections et la porosité du cuivre influent sur les phénomènes acoustiques, un phénomène de résonance apparaît, du au caractère fini du pavillon, et, on constate qu'en pratique le coefficient de transmission $T(f)$ n'est pas tout à fait nul pour les fréquences graves.

Par contre, on constate à l'écoute que le pavillon exponentiel n'est pas tout à fait juste. Et, si l'on compare les fréquences de résonance de différents pavillons avec les fréquences des notes de la gamme tempérée c'est le pavillon de Bessel¹ qui apporte le plus de justesse.

En pratique on cherche à réaliser un compromis entre le coefficient de transmission du pavillon exponentiel et la justesse apportée par le pavillon de Bessel.

Ces éléments complémentaires sur la physique du pavillon mettent bien en évidence l'importance de celui-ci dans la genèse du son de la trompette et donc l'impact majeur que peut avoir l'insertion d'une sourdine dans le pavillon d'une trompette, puisque cela revient à modifier plus ou moins violemment la forme apparente du pavillon.

2.1.2 Sons cuivrés et ondes de choc

Les trompettistes savent pour la plupart reconnaître et reproduire un son cuivré. En effet l'expression est très répandue chez les trompettistes et enseignée dans les écoles. On parle aussi de "cuivrage" du son. En réalité le phénomène n'a rien à voir avec le matériau puisqu'il intervient lors de la formation d'ondes de chocs dans l'instrument, quand les niveaux de pression excèdent environ 170 dB SPL.

Tout le fonctionnement décrit jusqu'ici se base sur un modèle linéaire de propagation des ondes, mais pour des grandes puissances acoustiques ce modèle ne donne pas de résultat satisfaisant notamment quand il s'agit de synthétiser le son d'une trompette à partir d'un modèle physique numérisé.

Pour comprendre ce qui se passe dans la trompette au-delà d'un certain niveau de pression il faut étudier la propagation des ondes en prenant en compte des termes ou phénomènes non-linéaires dans la modélisation.

1. C'est un pavillon dont le rayon varie selon une fonction de Bessel, une autre classe de fonctions permettant également de résoudre l'équation des pavillons.

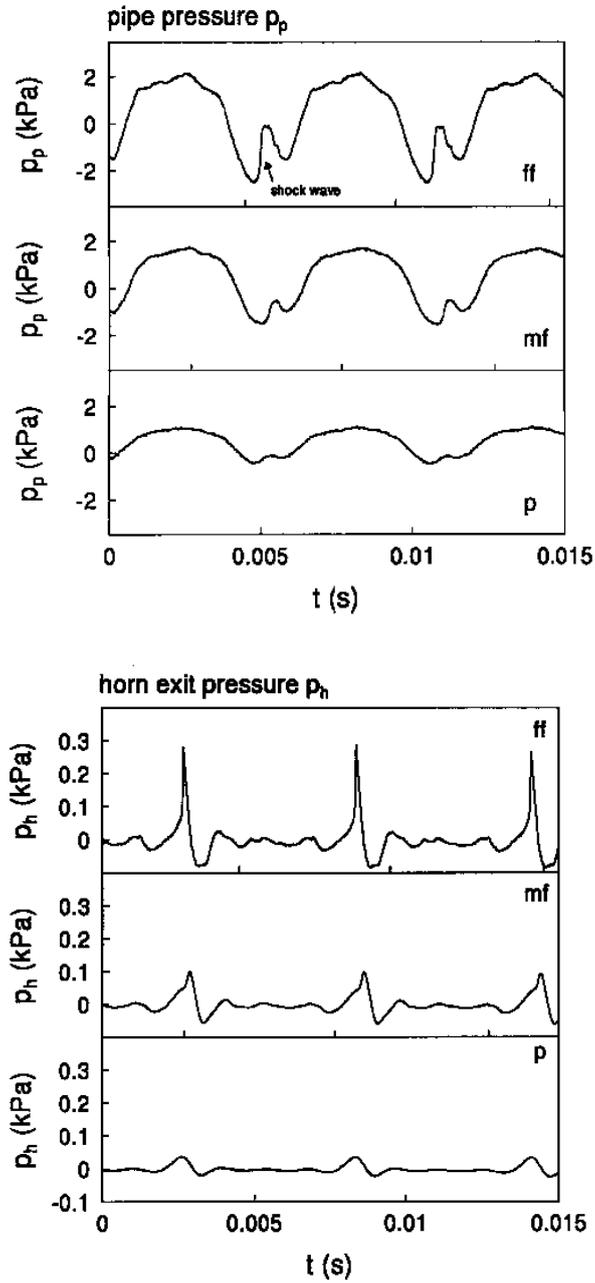


FIGURE 19 – Tracé de la pression dans le tuyau d'un trombone en haut et de la pression rayonnée par le pavillon d'un trombone en bas, à différentes nuances musicales. On observe la formation d'ondes de chocs quand le niveau de pression est élevé. Le comportement de la trompette est analogue à celui du trombone. D'après A. Hirschberg, J. Gilbert, R. Msallam, A.P.J. Wijnands, [18].

À fort niveau, on observe que l'onde se déforme au fur et à mesure de sa propagation dans la trompette pour adopter la forme d'une variation de pression très rapide (très localisée en temps et en espace) et très conséquente, ce que l'on appelle une onde de choc (cf. Figures 19) [18]. On nomme distance de formation la distance nécessaire pour passer de l'onde initiale à l'onde de choc.

Cette distance de formation que nous appellerons x_c est inversement proportionnelle au maximum de variation de la pression au point d'émission. Comme la distance x_c est par extension inversement proportionnelle à la pression au point d'émission, plus la pression dans l'embouchure augmente, plus la distance de formation x_c diminue. Et, au delà d'un certain niveau de pression, la distance de formation x_c devient plus petite que la longueur de la trompette et on peut alors observer la transformation de l'onde en onde de choc à l'intérieur de la trompette.

Les ondes de chocs se traduisent par un transfert d'énergie vers des harmoniques plus hautes. Le son gagne donc en brillance, en agressivité, d'où l'expression "son cuivré".

Sur une partition on ne trouve pas les mots son cuivré ou cuivrage. Dans la nomenclature musicale le symbole qui pourrait se rapprocher le plus de cette intention serait le crochet, ou le *forzando* (ou *forzato*) représenté en Figure 20.



FIGURE 20 – Symbole de notation d'un forzando.

Dans la partie suivante, nous étudierons notamment l'effet de différentes sourdines sur ce phénomène de cuivrage, mais, pour l'instant nous discutons de l'effet du placement d'une sourdine dans le pavillon (sourdine intra pavillonnaire) ou à la sortie de celui-ci (sourdine extra pavillonnaire).

2.1.3 Sourdines intra ou extra pavillonnaires

Les sourdines qui se placent dans le pavillon comme la sourdine sèche ou la wah-wah rendent le pavillon acoustiquement inexistant ou presque. L'onde n'est plus entièrement rayonnée par le pavillon mais plutôt par la sourdine.

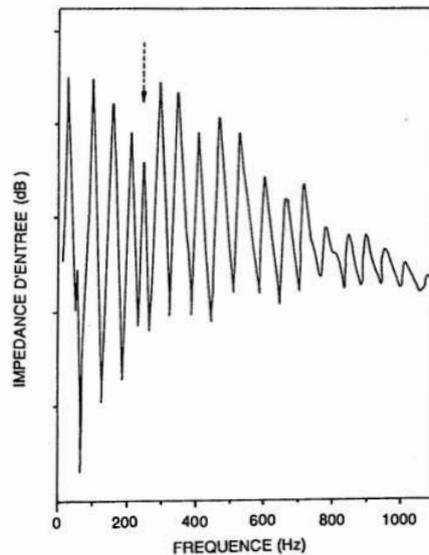


FIGURE 21 – Impédance d'entrée d'un trombone avec une sourdine sèche. D'après Caussé et Sluchin, [12] p.26.

En prenant le rôle du pavillon certaines sourdines internes raccourcissent le tube résonant et ont donc tendance à augmenter la fréquence du fondamental de l'instrument. On constate par exemple que les sourdines sèches faussent l'instrument en rajoutant quelques Hertz au fondamental.

Au contraire les sourdines se plaçant devant le pavillon comme la Velvet ou la Plunger apparaissent plutôt comme un obstacle au rayonnement de l'onde mais sans obturer complètement le pavillon.

Dans les deux cas, les sourdines modifient les fréquences et amplitudes des pics d'impédance des instruments puisqu'elles constituent un système acoustique qui se substitue au pavillon ou se place en série après le pavillon ce qui va forcément modifier l'impédance ramenée² associée à la trompette.

2. On définit en Annexe B la notion d'impédance ramenée, mais, on peut considérer simplement qu'il s'agit d'un principe fréquentiel qui permet de remplacer tout ce qui se trouve en aval (voire en amont) du point où on se place par une impédance de charge ou ramenée.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

Des pics parasites peuvent également apparaître si une paroi de la sourdine se met à vibrer. C'est le cas par exemple de la sourdine sèche, dont le fond, lorsqu'il vibre, fait apparaître un pic parasite comme rapporté par R. Caussé et B. Sluchin pour le trombone [12] (cf. Figure 2.1.3).

2.2 Protocole de mesure et d'analyse

2.2.1 Procotole et matériel de mesure

Dans le processus de conception d'un modèle alternatif j'ai choisi de modifier des modèles existants plutôt que de construire de toutes pièces un nouveau modèle. La caractérisation qui suit a pour but de faire apparaître et d'isoler des comportements intéressants pour les réutiliser dans mon prototype et, dans un cadre plus général, d'apporter des éléments d'analyse objectifs quant à l'effet d'une sourdine sur le timbre de la trompette. Le protocole mis au point est donc conçu pour être potentiellement applicable à d'autres instruments notamment s'agissant de la convention de nommage et des outils utilisés.



FIGURE 22 – Position du bol : en haut, enfoncé ; en bas, ouvert.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

J'ai sélectionné différents modèles de sourdines pour lesquelles j'ai pratiqué une batterie de mesures. Les sourdines ou configurations de sourdines choisies sont :

1. trompette ouverte
2. muette
3. sèche
4. wah-wah avec tube
5. wah-wah sans tube
6. bol avec le bol enfoncé (cf. Figure 22, en haut)
7. bol avec le bol légèrement sorti (cf. Figure22, en bas)
8. velvet
9. plunger

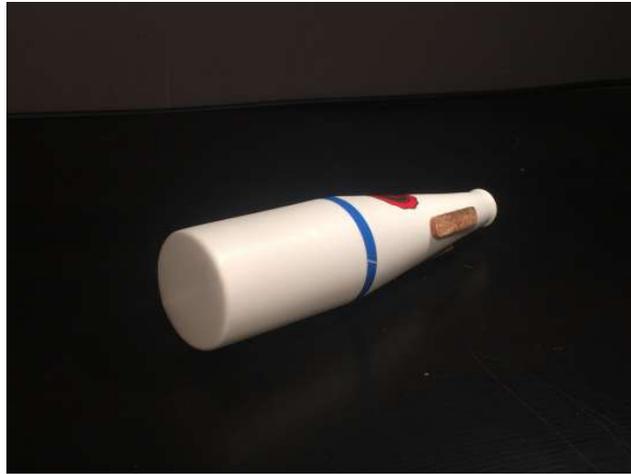


FIGURE 23 – Sourdine bol sans son bol. Le fond est fermé. Il existe également des modèles métalliques.

Pour chacune des sourdines j'ai enregistré six séries de 5 notes : sol3, do4, sol4, do5 et sol5, pour cinq nuances différentes, *piano*, *mezzopiano*, *mezzoforte*, *forte*, et *forte* "cuivré" c'est-à-dire *forzando*.

Il faut noter que la trompette utilisée est une trompette en si bémol et donc que les notes nommées, comme sur une partition de trompette en si bémol, sol3, do4, sol4, do5 et sol5 correspondent en réalité à la production des notes fa3, sib4, fa4, sib5 et fa5. Pour autant, nous adoptons dans la suite les noms de notes figurant sur la partition car c'est plus commode pour une partie du public cible, les trompettistes.

Il convient de préciser que le nombre suivant la note correspond à la convention anglo-allemande (ou grégorienne) plaçant la note (réelle ou perçue) la4 à 440 Hz et donc le sol3 à 196 Hz.

Le choix de ces notes est motivé par leur répartition sur la tessiture de trompette.

Les mesures ont été effectuées en plusieurs sessions avec un couple de microphones de mesures DBX RTA de l'école. La configuration est visible sur la Figure 24 page 30.

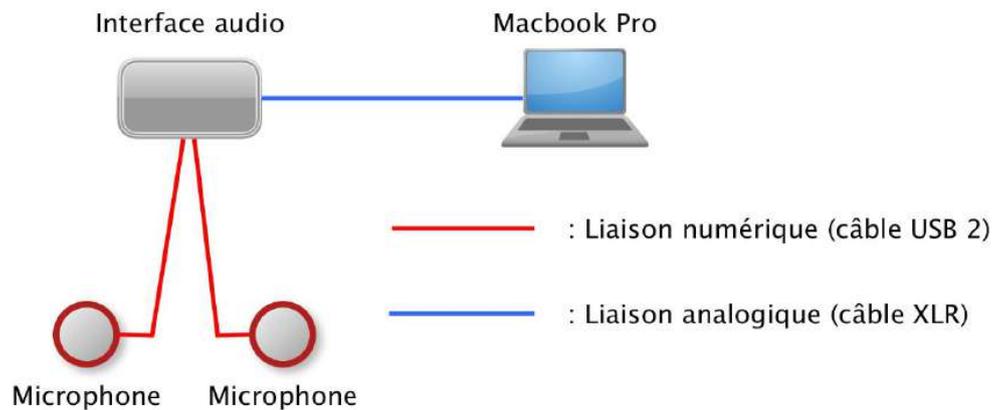


FIGURE 24 – Schéma représentant la configuration de prise de son pour les mesures.

L'interface audio est une MOTU Audio Express. On peut supposer que le convertisseur analogique numérique est doté d'un filtre coupe-bas : l'utilisation d'une interface audio et non d'une interface de mesures ne nous permet donc pas l'accès aux phénomènes physiques à l'œuvre pour des fréquences inférieures à 20 Hz. Le logiciel utilisé pour réaliser les enregistrements des mesures est Pro Tools 10 pour Mac OS 10.9.5.

Je n'ai pas utilisé de sonomètre pour les mesures car je n'en avais pas à ma disposition. Les mesures ont été faites dans une chambre d'appartement car le dispositif final est destiné à une utilisation domestique. Il ne me paraissait donc pas pertinent de faire les mesures dans une chambre sourde.

La première campagne de mesures a été quantifiée sur 24 bits entiers et échantillonnée à 48 kHz. Au vu de la grande dynamique constatée pour ces mesures j'ai préféré réaliser le reste des mesures au format 32 bits flottants (la configuration matérielle utilisée ne permet pas le travail en 32 bits entiers).

La version du logiciel IDS_Analyzer mise à ma disposition ne permet pas la lecture des fichiers WAV associés à mes mesures, qu'ils soient en 24 bits fixes ou en 32 bits flottants (format IEEE)³.

Après un certain nombre d'investigations tant du code que du contenu en hexadécimal des fichiers WAV, il s'avère que les fichiers WAV générés par ProTools ne sont pas des fichiers au format WAV standard notamment en 24 bits fixes ou en 32 bits flottants. En fait, ces fichiers ressemblent à des fichiers Broadcast WAV, format qui ne fait pas l'objet d'un standard suffisamment défini et qui introduit des ressources supplémentaires par rapport au format WAV standard.

Du coup, le nombre, la nature et l'ordre dans lequel les différentes ressources sont inscrites au sein du fichier WAV peut varier sensiblement d'un éditeur de logiciel audio (ou d'un constructeur d'interface audio) à l'autre.

Aussi, pour réaliser les analyses IDS avec l'IDS_Analyzer, on a procédé à la conversion de tous les fichiers de mesure, en 24 bits fixes comme en 32 bits flottants IEEE, au format WAV standard 32 bits fixes.

Les fonctions de lecture des fichiers WAV dans l'IDS_Analyzer ont été modifiées pour gérer la lecture des fichiers Broadcast WAV en ne s'intéressant qu'aux ressources correspondant aux formats WAV standards (16, 24 et 32 bits fixes ; 32 bits flottants IEEE). Des comparaisons d'analyse entre des séries de mesures originales et converties au format 32 bits fixes ont permis de constater que, lorsque les portraits IDS diffèrent selon le format, la différence correspond à une variation de 0,01 dB pour les poids relatifs de sous-bandes ou les niveaux moyens en dB FS. On peut donc considérer que la conversion au format 32 bits fixes n'a aucune incidence sensible sur les résultats d'analyse.

J'ai donc finalement un corpus de six répétitions pour cinq notes et pour cinq nuances, pour huit configurations de sourdines et la trompette débouchée ; donc 1350 mesures stéréophoniques puisque j'utilisais deux capteurs pour chaque mesure, soit au final 2700 mesures monophoniques. À ces mesures viennent s'ajouter celles correspondant aux modèles alternatifs de sourdines présentées dans la suite.

3. La prochaine version en cours de finalisation résoudra ce problème.

La convention de nommage des fichiers de mesures se présente comme suit :
`instrument_placement des micros_configuration de sourdine_note_`
`nuance_série_quantification_L ou R.`

Les conventions utilisées sont rassemblées dans la Table 1.

Configuration / Information	Nommage
Trompette en si bémol	TrumpBb
Microphones devant le pavillon	do
Microphones binauraux	bin
Microphone dans le pavillon avec sourdine muette insérée	up
Ouverte	open
Sèche	stt
Wah-wah avec tube	wai
Wah-wah sans tube	wao
Cup avec bol enfoncé	cpc
Cup avec bol légèrement sorti	cpo
Muette	pct
Velvet	vvt
Plunger	plg
Muette avec la première modification	pctmod1
Muette avec la seconde modification	pctmod2
Sol 3 (Fa 3 entendu)	g3
Do 4 (Sib 4 entendu)	c4
Sol 4 (Fa 4 entendu)	g4
Do 5 (Sib 5 entendu)	c5
Sol 5 (Fa 5 entendu)	g5
Extrait de musique classique	classic
Extrait de musique jazz	jazz
<i>piano</i>	p
<i>mezzopiano</i>	mp
<i>mezzoforte</i>	mf
<i>forte</i>	f
<i>forzando</i> (son cuivré)	fz
24 bits entiers	i24
32 bits flottants	f32
32 bits entiers	i32

TABLE 1 – Table présentant les conventions utiliser pour nommer les mesures.

Par exemple, pour une trompette en si bémol avec les microphones devant le pavillon, bouchée par une sourdine Plunger, jouant un do4 (sib4 entendu) à la nuance *forte*, appartenant à la deuxième série, utilisant une quantification en 32 bits flottants, pour la mesure avec le capteur de gauche, le nom de la mesure s'écrit :

TrumpBb_do_plg_c4_f_2_f32_L.

2.2.2 Principes d'analyse utilisés

Le principe d'analyse que l'on a mis en place repose sur la question de la nature de l'effet introduit par la sourdine, pour une sourdine donnée, une nuance de jeu choisie et la fréquence (ou le registre) de la note jouée.

Pour se conformer à ce schéma, nous utilisons dans la suite l'analyse IDS et les outils IDS disponibles.

L'analyse IDS (pour Intégration de Densité Spectrale) a été proposée par Leipp [19] dans une version analogique et transposée en une version numérique par Millot [20, 21, 22]. Une première diffusion de ces outils sous forme d'applications pour Mac OS 10.9.5 et suivants est disponible au libre téléchargement depuis le site www.autopsience.com. Des vidéos de prise en main des outils en français et en anglais sont disponibles sur la chaîne YouTube Autopsience.

L'analyse IDS correspond à une alternative à l'analyse de Fourier pour étudier notamment le contenu fréquentiel d'un signal.

Au lieu de donner accès au spectre calculé pour un jeu discret de fréquences, l'analyse IDS donne accès à la balance spectrale du signal définie comme le rapport de l'énergie cumulée dans la sous-bande étudiée à celle cumulée dans le signal étudié, pour un jeu de sous-bandes de fréquences découpant la gamme des fréquences entre 0 Hz et la fréquence de Nyquist (moitié de la fréquence d'échantillonnage). Cette approche permet de prendre en compte toutes les fréquences tout en obtenant une description synthétique puisque composée des poids relatifs (traduits en dB) pour chacune des sous-bandes composant le découpage fréquentiel auxquels on ajoute la donnée de niveau moyen en dB FS (moyenne de l'énergie cumulée pour le signal). On nomme cette collection de données portrait IDS du signal utilisé. Pour le découpage retenu on a 13 sous-bandes donc chaque mesure est décrite par 14 valeurs seulement.

Comme un portrait IDS se compose de poids en décibels, ou dB relatifs, pour chacune des sous-bandes et du niveau moyen en dB FS, on peut comparer deux signaux simplement en faisant la différence de leurs portraits IDS, ce qui revient à déterminer la fonction de transfert entre ces deux signaux. Cette fonction de transfert IDS correspond donc directement au gradient des deux portraits IDS, ce que nous nommons encore gradient IDS.

Un intérêt supplémentaire de l'analyse IDS tient à la possibilité d'obtenir par simple convolution par le jeu des filtres associés aux sous-bandes du découpage, les signaux de sous-bandes qui peuvent être utilisés pour faire une re-synthèse partielle à totale, sans erreur, par simple addition des signaux de sous-bandes (application : `IDS_Resynthesis_Preparator`).

Enfin, on peut aussi choisir le découpage fréquentiel utilisé en l'adaptant par exemple à la nature des signaux étudiés.

Ainsi, pour étudier l'impact d'une sourdine, pour une nuance choisie et une note émise, il suffit de :

- calculer le portrait IDS de chacune des deux mesures, avec et sans la sourdine, grâce à l'`IDS_Analyzer` (cf. Figures 25 et 26) ;
- calculer le gradient IDS donc la fonction de transfert en soustrayant le portrait IDS de la mesure sans sourdine au portrait IDS de la mesure IDS grâce à l'`IDS_Gradients_Bigradients_Generator` (cf. Figure 27) ;
- tracer les portraits IDS et le gradient IDS à partir de l'`IDS_Plotter` (cf. Figure 28).

Et, vu que l'on avait deux microphones de mesure pendant les mesures, on obtient deux portraits IDS par mesure, un portrait IDS pour la voie gauche et un autre pour la voie droite, qui permettent de calculer deux gradients IDS : un gradient IDS pour la voie gauche ; un autre pour la voie droite.

Il reste alors à étudier ce que peuvent nous apprendre ces collections de gradients IDS.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

IDS file version	0.91
Wave file path	Cup_Close_f_C4_Audio_L/
Wav file name	artificial_statistical_median.wav
Number of channels	1
Number of samples	0
Sample rate (Hz)	44100
Bits per samples	32
Analysis type	AUDIO
Filter size	44263
Subband relative energy (dB):	
Channel name	1
0-30	-43.22
30-60	-48.52
60-80	-55.36
80-100	-58.33
100-120	-54.61
120-250	-40.06
250-500	-8.75
500-1000	-0.7
1000-2000	-20.52
2000-4000	-28.58
4000-8000	-35.16
8000-16000	-46.54
16000-22050	-62.77
Channel energy (dB FS)	-39.94

FIGURE 25 – Portrait IDS médian pour la sourdine bol avec le bol enfoncé pour un do4 joué *forte*.

IDS file version	0.91
Wave file path	Open_f_C4_Audio_L/
Wav file name	artificial_statistical_median.wav
Number of channels	1
Number of samples	0
Sample rate (Hz)	44100
Bits per samples	32
Analysis type	AUDIO
Filter size	44263
Subband relative energy (dB):	
Channel name	1
0-30	-42.61
30-60	-55.12
60-80	-67.01
80-100	-70.77
100-120	-71.62
120-250	-13.65
250-500	-10.96
500-1000	-4.89
1000-2000	-4.12
2000-4000	-7.9
4000-8000	-29.19
8000-16000	-45.97
16000-22050	-55.78
Channel energy (dB FS)	-39.33

FIGURE 26 – Portrait IDS médian pour la trompette débouchée pour un do4 joué *forte*.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

IDS gradient file version	0.91	
Wave file path	Open_f_C4_Audio_L/	Cup_Close_f_C4_Audio_L/
Wav file name	artificial_statistical_median.wav	artificial_statistical_median.wav
Number of channels	1	
Number of samples	0	0
Sample rate (Hz)	44100	
Bits per samples	32	32
Analysis type	Audio	
Filter size	44263	44263
Subband relative energy gradient (dB):		
Channel name	1	
0-30	-0.61	
30-60	6.6	
60-80	11.65	
80-100	12.44	
100-120	17.01	
120-250	-26.41	
250-500	2.21	
500-1000	4.19	
1000-2000	-16.4	
2000-4000	-20.68	
4000-8000	-5.97	
8000-16000	-0.57	
16000-22050	-6.99	
Channel energy gradient (dB FS)	-0.61	

FIGURE 27 – Gradient IDS médian du son trompette débouchée *vs* son de sourdine bol avec bol enfoncé pour un do4 joué *forte*.

IDS profile: idsStat_TrumpBb_do_open_vs_TrumpBb_do_cpc_c4_f_L.ids.grad_A

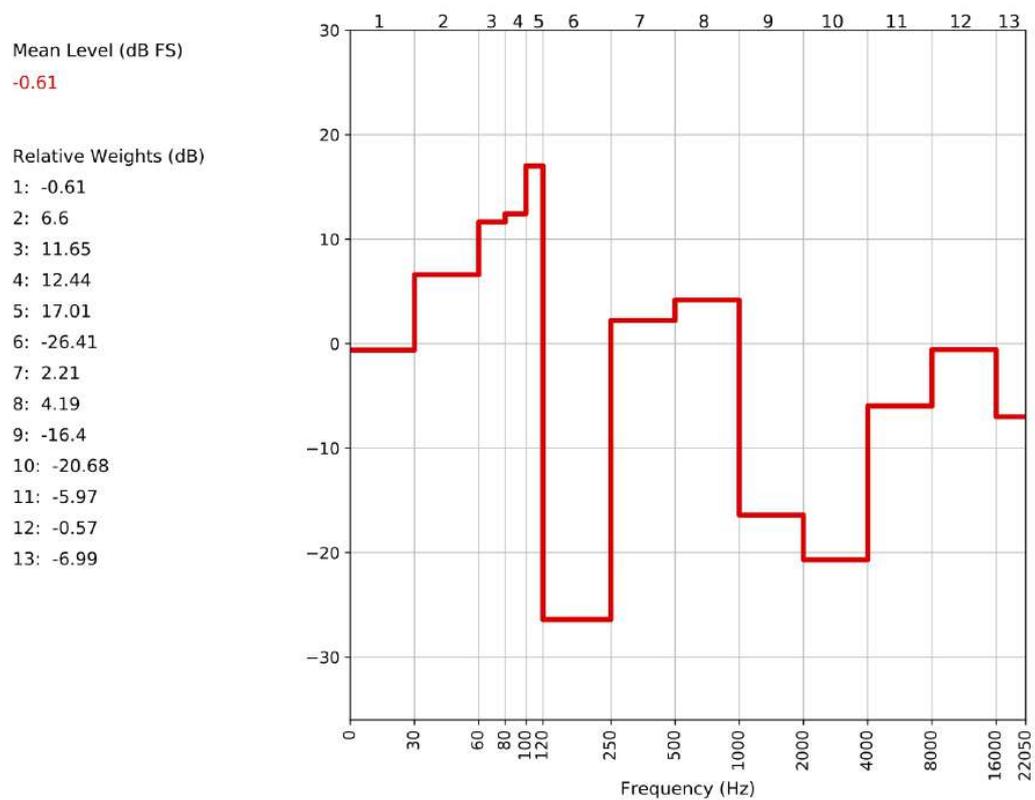


FIGURE 28 – Tracé du gradient présenté dans la Figure 27.

A ce stade, si on fait cela pour l'ensemble des mesures, on dispose d'une série de répertoires informatiques rassemblant les analyses pour une sourdine (premier sous répertoire), pour une nuance (deuxième série de sous-répertoires à l'intérieur des premiers) et pour une série de répétitions pour chacune des cinq notes testées (troisième série de sous-répertoires) et ce notamment pour les fichiers des portraits IDS, les fichiers des gradients IDS ainsi que les figures des gradients IDS.

Afin d'essayer de dégager des premières tendances, chacune des séries de mesures donne lieu à une analyse statistique permettant de déterminer des portraits IDS mini, médian et maxi :

- pour le portrait mini on ne conserve que la valeur minimale du poids relatif pour chacune des sous-bandes ou du niveau moyen ;
- pour le portrait médian ce sont les valeurs médianes qui sont conservées ;
- pour le portrait maxi ce sont les valeurs maximales.

On peut alors notamment tracer le portrait IDS du portrait médian ainsi que la superposition des portraits mini et maxi pour évaluer les variations en sous-bandes liées à la répétition de la note (cf. Figure 29).

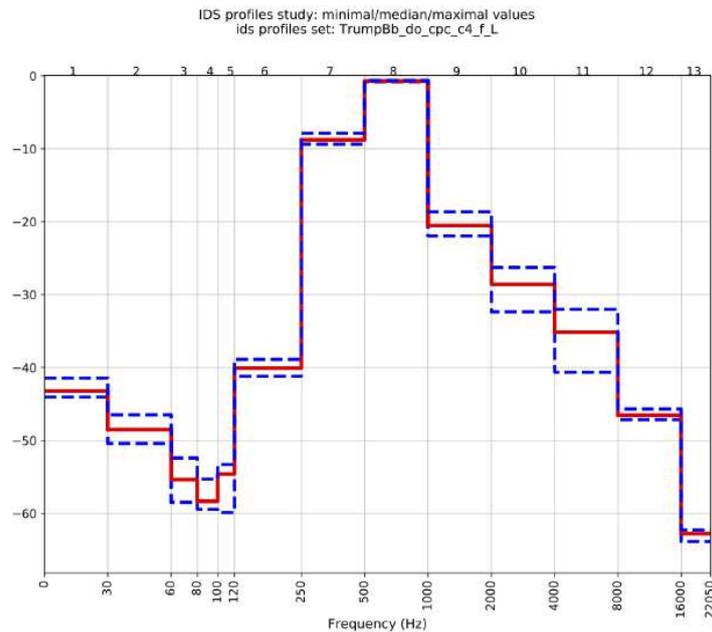


FIGURE 29 – Tracé des portraits mini, maxi et médian pour la mesure du do4 joué forte avec une trompette bouchée par une sourdine bol avec le bol enfoncé.

A partir des portraits médians pour une sourdine, une nuance de jeu et une note choisie, on peut calculer le gradient IDS médian. Puis, en retranchant le portrait IDS de la trompette sans sourdine on a accès à la fonction de transfert médiane pour une sourdine, une nuance de jeu et une note choisie.

Les portraits IDS tracés fournissent notamment le poids relatif pour chacune des sous-bandes :

- une valeur négative correspond à un défaut d'énergie dans la sous-bande (donc à une perte de poids dans la balance spectrale pour la sous-bande) dans le son avec sourdine comparé au son sans sourdine ;
- une valeur positive du poids relatif correspond à un gain d'énergie dans la sous-bande (donc un gain de poids dans la balance spectrale pour la sous-bande) pour le son avec sourdine comparé au son sans sourdine.

Il reste encore à préciser le découpage fréquentiel choisi pour réaliser l'étude ce qui fait en Table 2.

Découpage	Désignation	Ressenti perceptif
0 à 30	extrême grave	trippal
30 à 60		
60 à 80	grave	rondeur
80 à 100		
100 à 120		
120 à 250	haut grave	résonance
250 à 500	bas médium	corps
500 à 1000	médium	octave de transition
1000 à 2000	haut médium	octave de clarté
2000 à 4000	bas aigu	agressivité
4000 à 8000	centre aigu	présence
8000 à 16000	extrême aigu	définition
16000 à 22050		

TABLE 2 – Découpage fréquentiel utilisé par les outils d'analyse IDS et lexique correspondant, tel qu'enseigné à Louis Lumière dans les cours concernant le son musical.

2.3 Résultats pour la caractérisation objective des sourdines

Les analyses statistiques présentées dans la partie précédente sont étudiées dans la suite.

On introduit dans le texte uniquement les tracés représentatifs des tendances émergentes mais l'intégralité des fichiers d'analyse (mesures, portraits, gradients, figures, produit des analyses statistiques) peut être trouvée sur le support numérique accompagnant ce mémoire.

On remarque dans les résultats qui suivent que quelque chose se passe dans l'extrême grave mais comme précisé plus haut les informations en-dessous de 20 Hz ne sont *a priori* pas entièrement fiables à cause du recours quasi certain à un filtrage coupe-bas.

Avant de présenter les résultats je donne ici quelques explications sur le lexique auquel je fais appel dans cette partie :

- niveau sans qualificatif renvoie au niveau d'énergie ;
- bas niveaux, faibles niveaux : nuances associées à la production de notes avec un faible niveau sonore, c'est-à-dire *piano* et *mezzopiano* ;
- hauts niveaux, forts niveaux : nuances associées à la production de notes avec un fort volume sonore, c'est-à-dire *forte* et *forzando* ;
- niveaux moyens : nuance *mezzoforte* ;
- registre grave : registre de la trompette le plus bas, renvoie ici à la note jouée sol3 ;
- registre médium : registre moyen de la trompette, renvoie ici aux notes jouées do4 et sol4 ;
- registre aigu : registre de la trompette le plus haut, renvoie ici aux notes jouées do5 et sol5.

2.3.1 Sourdine sèche

Pour la sourdine sèche les courbes suivent toutes la même tendance (cf. Figure 30), quelle que soit la nuance. Une perte de niveau général comprise entre 6 et 10 dB sur tout le spectre. Pour la nuance *piano*, l'atténuation moyenne est de 7,7 dB, elle est de -6,7 dB *mezzoforte*.

Les pertes les plus importantes apparaissent entre 250 et 1000 Hz, voire entre 120 et 250 Hz pour la nuance *piano*. On perd jusqu'à 19 dB dans cette bande de fréquences. L'écart se creuse quand le volume sonore augmente. Pour la nuance *mezzoforte* la perte atteint même 21 dB entre 120 et 250 Hz dans le registre moyen bas (do 4) (cf. Figure 27).

Dans quasi tous les cas de figures ce creux s'accompagne d'un gain entre 60 et 120 Hz, voire entre 60 et 250 Hz pour le registre aigu quand on joue *piano*. Un gain de niveau est également observable entre 2000 et 8000 Hz. Il est par exemple de 20 dB lorsque l'on joue *forte* dans le registre aigu.

Lorsque l'on cuivre, c'est-à-dire pour la nuance *forzando*, la perte générale est moins grande puisqu'on ramène de l'énergie dans l'aigu. Elle est en moyenne de 5,2 dB. Le creux dans le bas-médium et médium est toujours présent, entre 250 et 1000 Hz (cf. Figure 28).

Pour résumer la sourdine sèche apporte une perte de niveau général qui s'échelonne entre -5 et -10 dB environ selon que l'on cuivre ou non. On perd beaucoup de bas médium : la bande 120-250 Hz est parfois atténuée de plus de 20 dB. Au contraire les bandes 60-120 Hz et 2000-8000 Hz présentent un excès d'énergie, ainsi que l'extrême-grave qui est renforcé en moyenne de 5 dB.

On peut proposer une allure en U pour ces gradients IDS.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

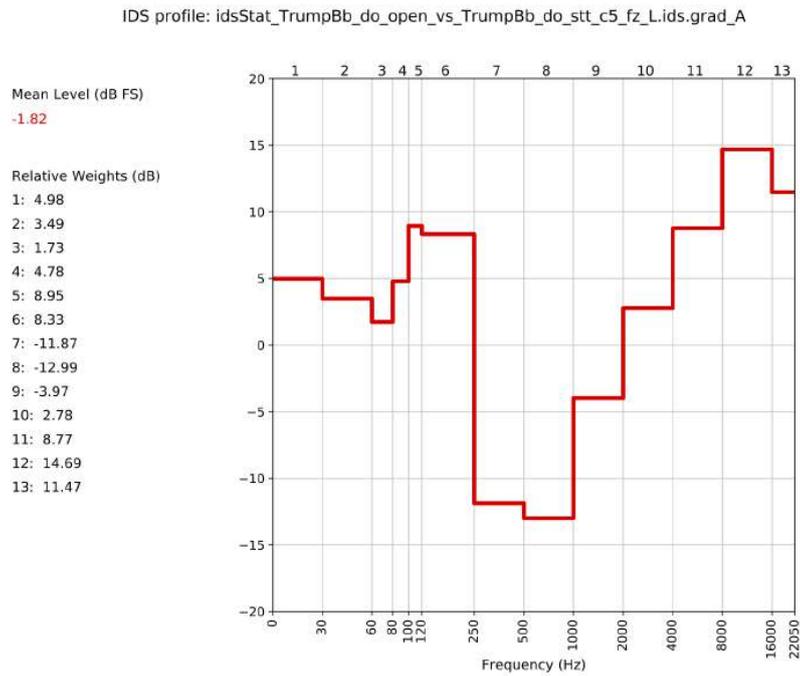
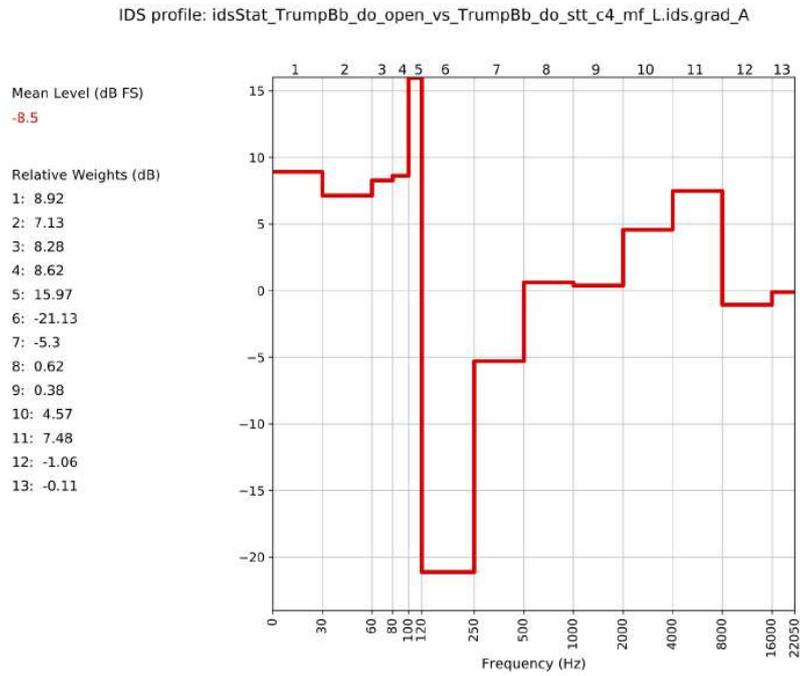


FIGURE 30 – Tracé du gradient du son produit avec une sourdine *vs* sans sourdine pour une sourdine sèche. En haut : nuance *mezzoforte* pour un do4 ; en bas : do 5 et avec un son cuivré, nuance *forzando*.

Lien avec mon étude :

La sourdine sèche est une sourdine intra-pavillonnaire. Elle déroutte une partie de l'énergie du pavillon vers son propre corps vibrant, principalement constitué par le fond de la sourdine. En effet on a pu constater que le fond de la sourdine sèche résonne et fait apparaître un nouveau pic d'impédance parasite comme dit dans la section 2.1.3.

De plus l'analyse spectrale IDS confirme que malgré une perte d'énergie dans les médiums entre 250 et 1000 Hz le niveau général reste élevé et notamment renforcé dans les hauts médiums et les aigus entre 2000 et 8000 Hz.

Ces éléments montrent quelques caractéristiques à éviter pour une sourdine visant à atténuer le son : utilisation du métal pour la fabrication de la sourdine, conception introduisant une cavité avec un fond vibrant.

2.3.2 Sourdine Wah avec tube

Le comportement de la sourdine Wah avec le tube paraît relativement homogène quelle que soit la nuance. Une atténuation assez forte entre 250 et 500 Hz apparaît et persiste pour toutes les nuances et tous les registres avec tout de même une tendance moins prononcée quand on monte dans l'aigu à bas niveau, entre 8 et 16 kHz (cf. Figures 31).

Le niveau d'énergie augmente dans l'aigu, entre 8 et 16 kHz, quand on joue le registre aigu à un niveau fort, ou pour toute la tessiture quand on cuivre, nuance *forzando*.

À l'opposé le niveau augmente dans le grave, entre 60 et 120 Hz quand on joue *mezzoforte* et ce pour toute la tessiture. On trouve par exemple un gain de presque 19 dB entre 60 et 100 Hz pour le sol3 joué *piano*, et un gain de 10 dB entre 8 et 16 kHz pour le son cuivré, nuance *forzando*.

Finalement, comme pour la sourdine sèche, on peut proposer pour ces gradients IDS une allure en U : atténuation des médiums (atténuation du maximum d'énergie pour une trompette débouchée) et "transfert" de l'énergie vers les extrêmes avec des variations selon que l'on joue plus ou moins fort.

L'atténuation globale de niveau sur tout le spectre et toutes les nuances est de -7,7 dB.

Lien avec mon étude :

La sourdine Wah avec le tube, ou 'stem' en anglais dans les partitions, n'atténue finalement que peu le niveau global tout en apportant un gain dans l'aigu qui serait assez indésirable dans le cadre d'une sourdine muette. Le matériau (métal) semble être un dénominateur commun avec la sourdine sèche, ce qui renforce l'idée selon laquelle il ne faut pas fabriquer la sourdine en métal.

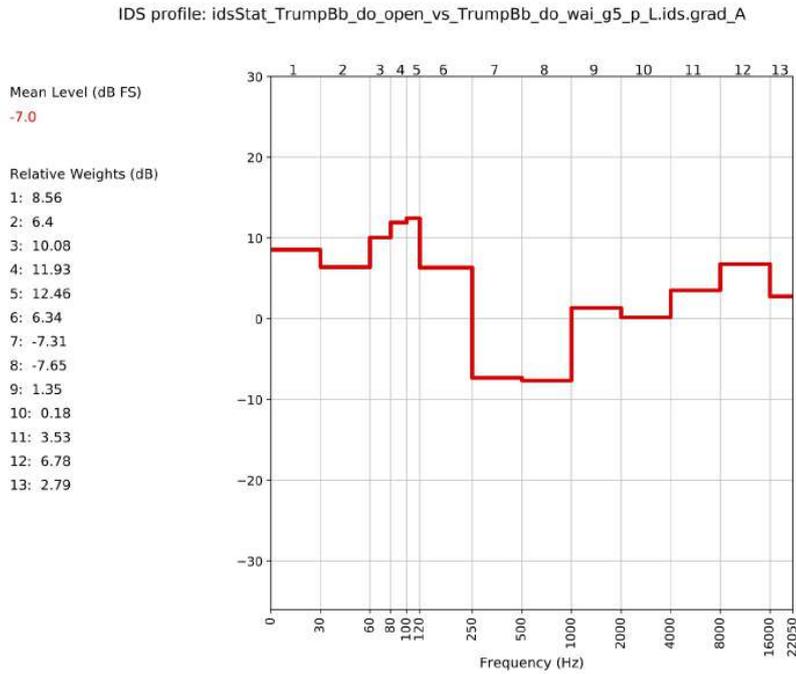
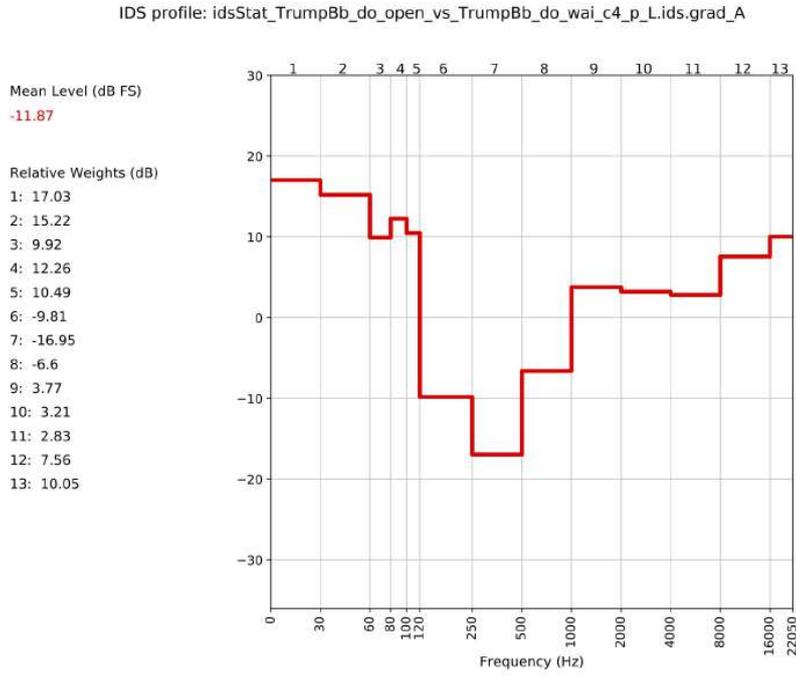


FIGURE 31 – Tracé du gradient son avec sourdine *vs* son sans sourdine pour une sourdine wah avec tube. En haut : registre médium et bas niveau ; en bas : registre aigu et bas niveau.

2.3.3 Sourdine Wah sans tube

La courbe suit la même tendance que pour les sourdines sèches et Wah avec tube à quelques différences près tout de même.

On trouve une atténuation dans les médiums (500-1000 Hz) et une atténuation plus importante dans les hauts médiums (1-2 kHz). Pour un do4 joué piano, la bande des hauts médiums est atténuée de 17 dB (cf. Figure 32).

Les fréquences en deçà, jusqu'à 250 Hz sont renforcées, et ce quel que soit la nuance ou le registre. Par exemple pour le sol4 *forte*, on constate un gain de 20 dB entre 30 et 250 Hz.

Le haut du spectre est également renforcé mais de façon plus variable selon le registre. Dans l'aigu, que l'on soit *forte* ou *piano* les hautes fréquences sont fortement renforcées, avec par exemple 35 dB de plus entre 4 et 8 kHz pour un sol5 joué *piano*, ou encore 35 dB entre 8 et 16 kHz pour un do5 joué *forte*. Dans le grave, le haut du spectre n'est pas renforcé, voir atténué comme on peut le voir sur la Figure 32.

L'atténuation globale est de -13 dB pour cette sourdine, et de -15 dB si on omet de la moyenne les mesures du sol3, c'est-à-dire du registre grave de la trompette.

Lien avec mon étude :

Le niveau est ici plus fortement atténué que dans les deux cas précédents mais la sourdine est toujours en métal et on retrouve un renforcement des hautes fréquences quasi-systématique.

De plus dans le cas de la sourdine Wah, le dispositif en liège qui lie la sourdine au pavillon entourent complètement l'extrémité de la sourdine : ce ne sont pas des lames mais une seule pièce de liège.

La part de l'énergie rayonnée par le pavillon est donc nettement moins importante que pour la sourdine sèche par exemple et les sensations du trompettistes en pâtissent : une plus grande part de l'énergie revient dans les lèvres du trompettiste, ce qui est à proscrire.

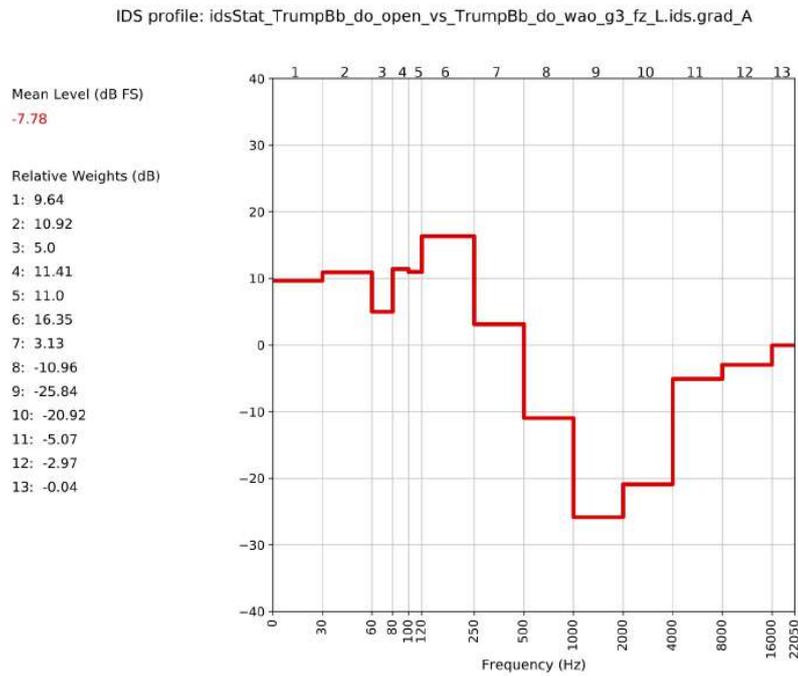
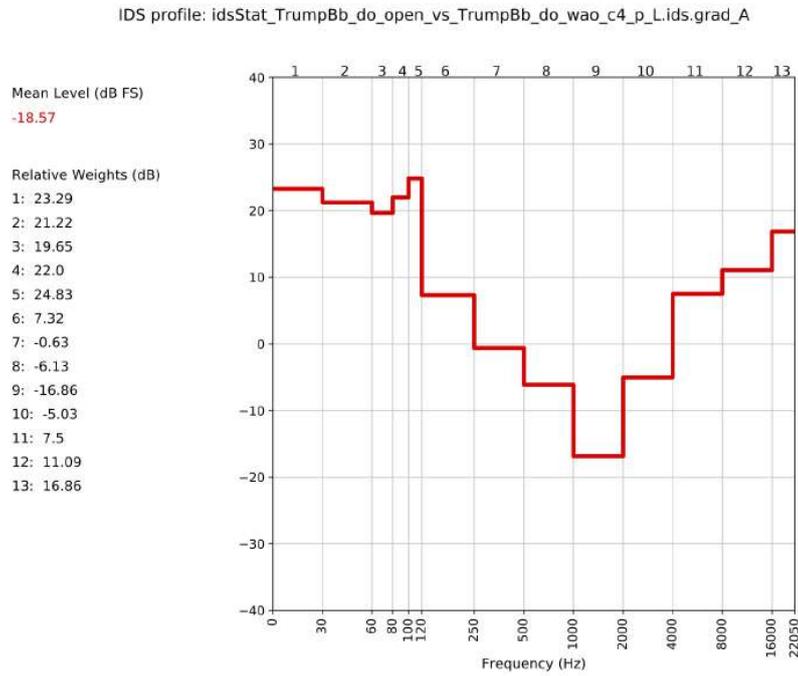


FIGURE 32 – Gradient son avec sourdine *vs* son sans sourdine pour une sourdine Wah sans le tube. En haut : do4, donc son registre médium, *piano* ; en bas : sol3 donc son registre grave en cuivrant le son, nuance *forzando*.

2.3.4 Sourdine bol avec bol enfoncé

On voit apparaître pour la sourdine bol avec le bol enfoncé une tendance quelle que soit la nuance, mais qui varie avec le registre.

Dans les médiums, c'est-à-dire ici pour le do4 et sol4 on voit deux creux francs se dessiner dans la courbe, entre 120 et 250 voire 500 Hz, et entre 1 et 2, voire 4 kHz. Par exemple pour le do4 *mezzoforte* on peut lire -19 dB entre 120 et 250 Hz et environ -23 dB entre 1 et 4 kHz (cf. Figure 33).

Dans le grave, c'est-à-dire pour le sol3 par exemple, le creux le plus haut entre 1 et 4 kHz se dessine déjà mais de manière moins franche, tandis que le premier creux n'existe pas ou à peine (cf. Figure 33). Dans l'aigu, c'est-à-dire pour le do5 ou le sol5 on retrouve le même comportement (cf. Figure 34), pas de creux entre 120 et 500 Hz, un gain plutôt, mais un creux entre 1 et 2 kHz plus prononcé encore que pour le registre médium.

Dans l'extrême-grave et plus précisément en dessous de 30 Hz la sourdine n'a pas d'impact apparent sur les courbes.

L'atténuation globale pour cette sourdine est de -4,6 dB.

Lien avec mon étude : La courbe est encore accidentée pour cette sourdine avec une atténuation globale assez faible.

Le point positif à relever est que, comme pour la sourdine sèche, les sensations du trompettiste sont assez peu modifiées.

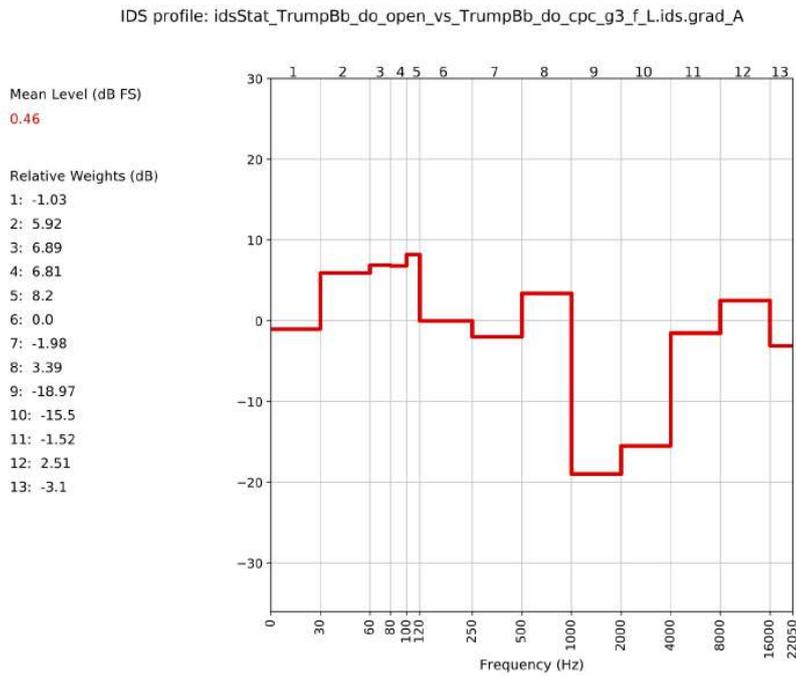
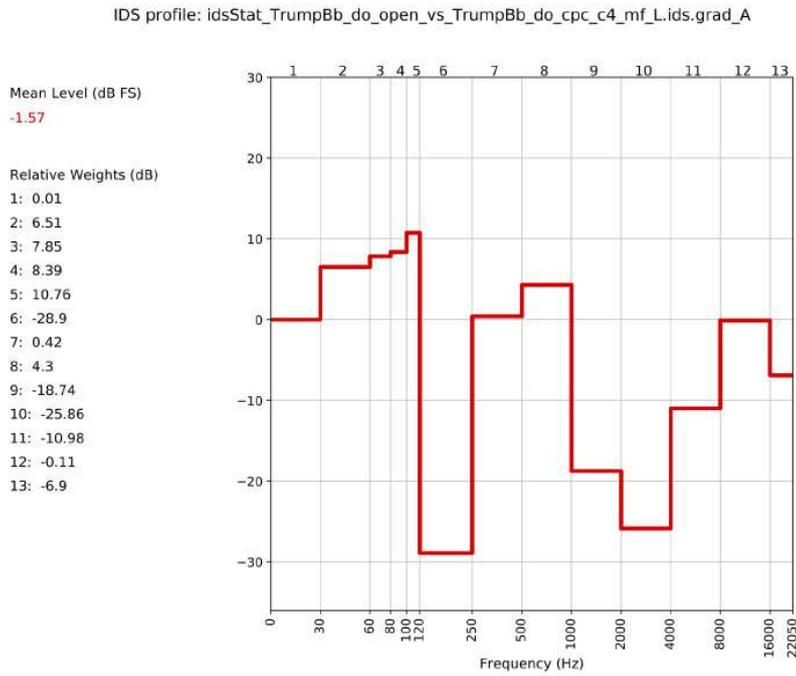


FIGURE 33 – Tracé du gradient son avec sourdine *vs* son sans sourdine pour une sourdine bol dont le bol est enfoncé. En haut : do4 donc dans le registre moyen, et niveau moyen, nuance *mezzoforte* ; en bas : sol3 donc dans le grave ; nuance *forte*.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

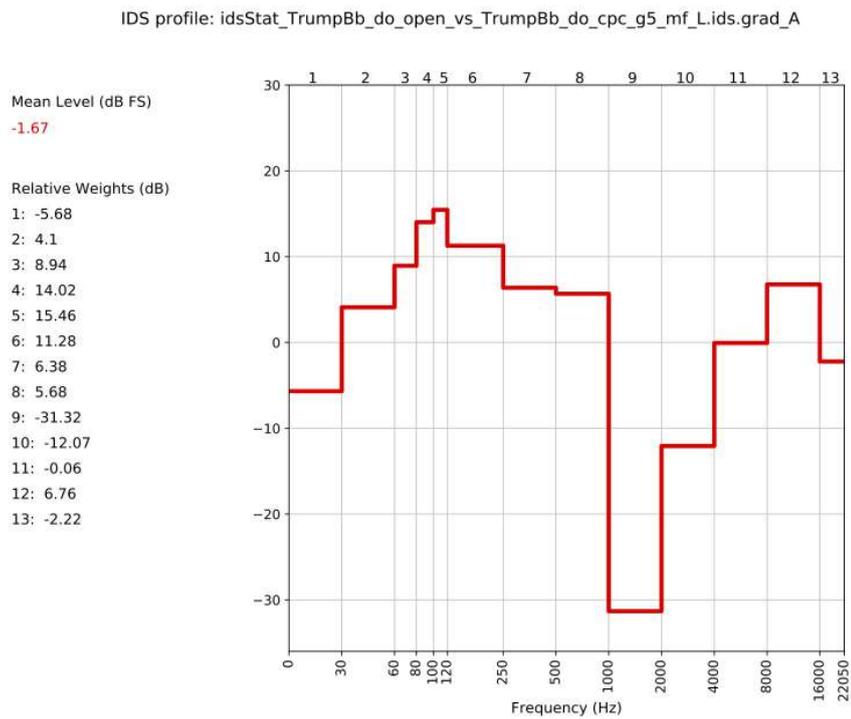


FIGURE 34 – Tracé du gradient son avec sourdine *vs* son sans sourdine pour une sourdine bol dont le bol est enfoncé, pour un sol $\frac{5}{4}$ donc registre aigu, nuance *mezzo-forte*. Le premier creux est inexistant, le deuxième est lui très prononcé.

2.3.5 Sourdine bol avec bol ressorti

Pour chaque nuance, lorsque l'on joue un do4, donc dans la tessiture moyenne grave un creux apparaît entre 120 et 250 Hz et un autre moins important entre 2 et 4 kHz (cf. Figure 35). Cela nous rappelle le comportement de la même sourdine avec le bol enfoncé.

Cependant en dehors du do4 le comportement est assez différent. La sourdine amène un gain dans les basses fréquences, entre 60 et 500 Hz, pour tous les registres mais en particulier quand on joue dans l'aigu. Cependant pour le sol4 le creux entre 250 et 500 Hz est encore évident.

Dans l'aigu on trouve aussi un gain dans les hautes fréquences, entre 4 et 16 kHz (cf. Figure 35). La courbe a encore une fois une forme de U.

Dans l'extrême-grave la sourdine a peu d'impact apparent quand joue dans l'aigu, mais apporte un gain de niveau en dessous de 30 Hz lorsque l'on joue le registre moyen à n'importe quelle nuance (cf. Figure 35).

Lien avec mon étude :

La sourdine bol quand le bol est ressorti n'atténue finalement que peu le son. On retrouve un effet 'loudness' avec un renforcement entre autres des hautes fréquences. Ce comportement serait assez indésirable pour une sourdine muette.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

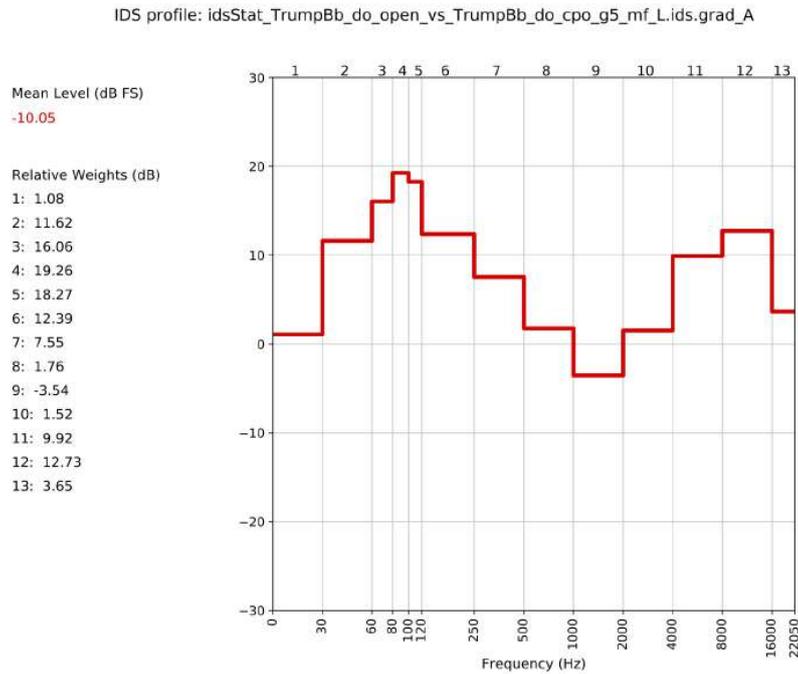
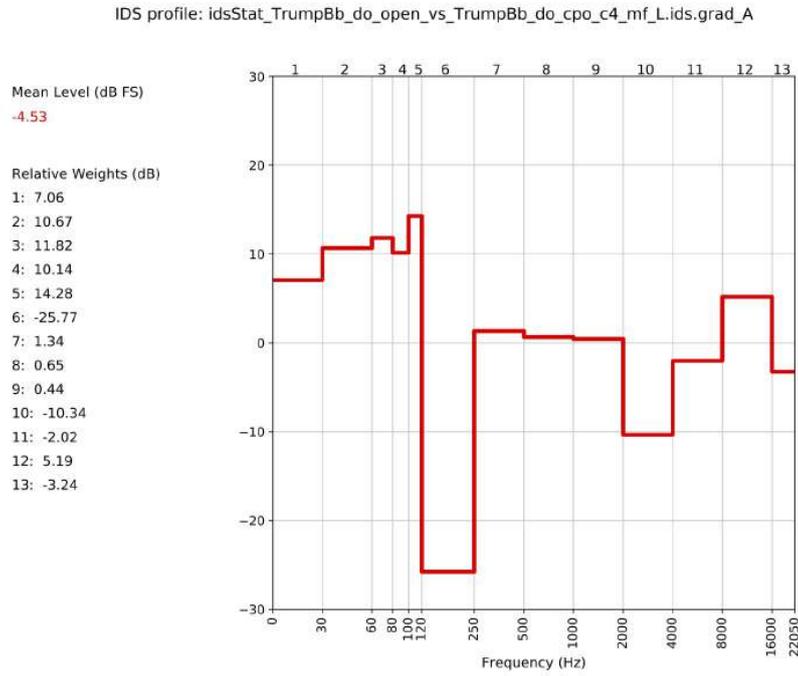


FIGURE 35 – Tracé du gradient son avec sourdine *vs* son sans sourdine pour une sourdine bol dont le bol est ressorti. En haut : do4 donc registre médium, niveau moyen ; en bas : sol5 donc registre aigu, niveau moyen (*mezzoforte*).

2.3.6 Sourdine muette

La sourdine muette est naturellement celle qui atténue le plus le son, jusqu'à -35 dB pour un do4 avec le son cuivré par exemple, nuance *forzando*. L'atténuation est d'autant plus grande que l'on joue fort. À la nuance *piano*, l'atténuation est en moyenne de -26 dB sur la tessiture de la trompette, alors qu'elle est de -30 dB pour la nuance *forzando* et ce entre 250 et 2000 Hz alors que l'on observe un gain entre 0 et 250 Hz et au-dessus de 8 kHz (cf. Figure 36).

La courbe a toujours tendance à être accidentée. L'atténuation est la plus forte entre 120 et 8000 Hz, avec pour le sol3 donc registre grave une atténuation qui descend jusqu'à 100 Hz et qui monte jusqu'à la limite de l'étude, 22050 Hz (cf. Figure 36). Par ailleurs le registre grave est particulièrement difficile à jouer sur une trompette bouchée par une telle sourdine muette.

Le registre aigu exhibe un léger gain entre 8 et 16 kHz quand on joue *forte* ou *forzando*.

Le son cuivré semble exacerber le comportement de la sourdine : on suit les mêmes tendances mais elles sont plus marquées.

Lien avec mon étude :

La partie suivante de ce chapitre est consacrée à la conception du modèle alternatif qui se base sur ce modèle de sourdine. J'analyse donc les points forts et points faibles de cette sourdine dans la partie suivante, page 64.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

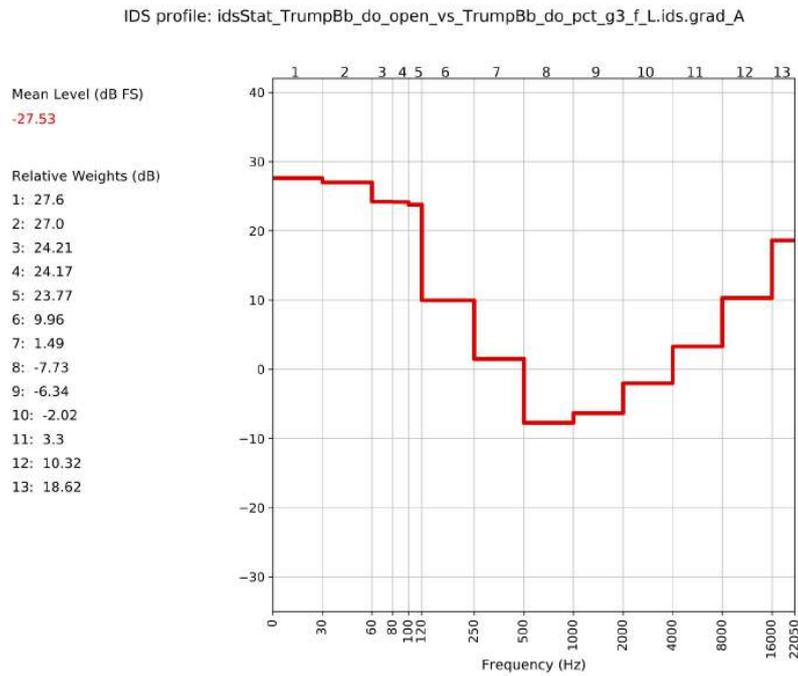
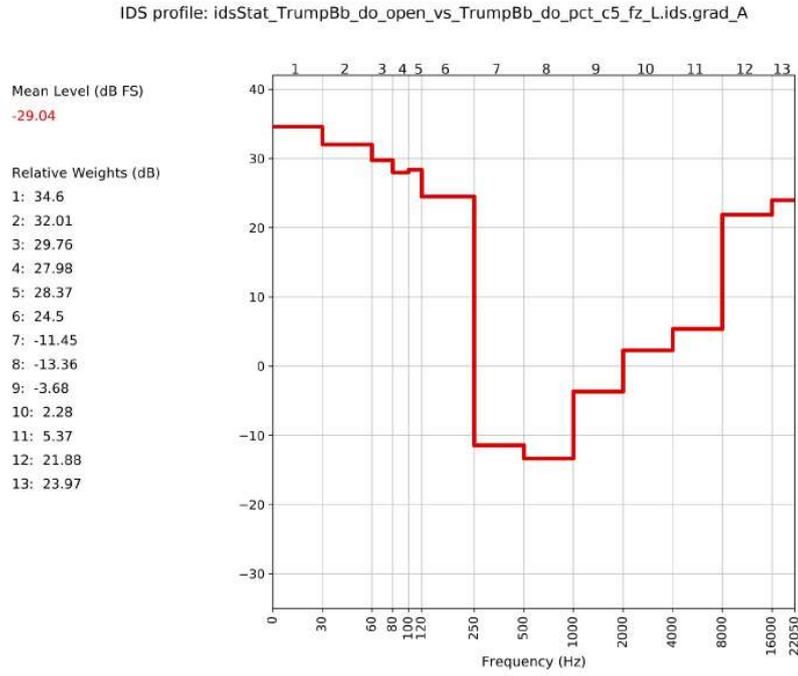


FIGURE 36 – Tracé du gradient son avec sourdine *vs* son sans sourdine pour une sourdine muette. En haut : do5 donc registre médium/aigu, son cuivré, nuance *forzando* ; en bas : sol3 donc registre grave, niveau fort.

2.3.7 Sourdine Velvet

La sourdine Velvet présente un profil très accidenté qui a tendance à légèrement s'aplatir quand le niveau augmente.

Pour la nuance *piano*, lorsque l'on joue une note grave, les basses (en-dessous de 250 Hz) et hautes fréquences sont atténuées tandis que deux bandes de fréquences dans les médiums sont au contraire renforcées : entre 250 et 500 Hz, et entre 2 et 4 kHz (cf. Figure 37). Quand on monte dans le registre aigu on garde les mêmes tendances mais l'atténuation dans les basses fréquences est moins importante.

Finalement quand on joue un sol 5 à la nuance *piano* les basses fréquences ne sont plus atténuées. On retrouve le gain entre 250 et 500 Hz, le gain dans le haut-médium s'est lui étendu sur toute la bande de 2 à 16 kHz.

À un niveau plus fort, l'atténuation des graves est moins importante et ce quel que soit le registre. Au contraire les hautes fréquences sont bien plus atténuées. On peut noter également que les deux bandes de fréquences qui étaient renforcées à bas niveau ne le sont plus vraiment à fort niveau. La bande de 250 à 500 Hz voit quand même son niveau augmenter en particulier pour le do 4 joué *forte*, alors que les basses fréquences en dessous de 120 Hz sont atténuées. Les hautes fréquences sont atténuées, au-dessus de 2 kHz en particulier (cf. Figure 37).

Un effet flagrant du cuivrage est de renforcer les basses fréquences et d'augmenter le gain des bandes de fréquences bas-médium notamment entre 250 et 500 Hz et pour tous les registres (cf. Figure 38). Les hautes fréquences, au-dessus de 4 kHz, sont atténuées quel que soit le registre (cf. Figure 38).

L'extrême-grave est atténué sur toutes les courbes.

L'atténuation en niveau est assez faible pour la sourdine Velvet qui colore le son mais fait peu diminuer le niveau. On obtient -4,4 dB de niveau global moyen relatif pour la nuance *mezzopiano* et -2,6 dB pour la nuance *forte*.

Lien avec mon étude :

La sourdine Velvet a un comportement singulier. Aucune autre sourdine étudiée jusqu'ici ne présentait des gradients IDS avec cette allure, notamment dans les hautes fréquences à des forts niveaux.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

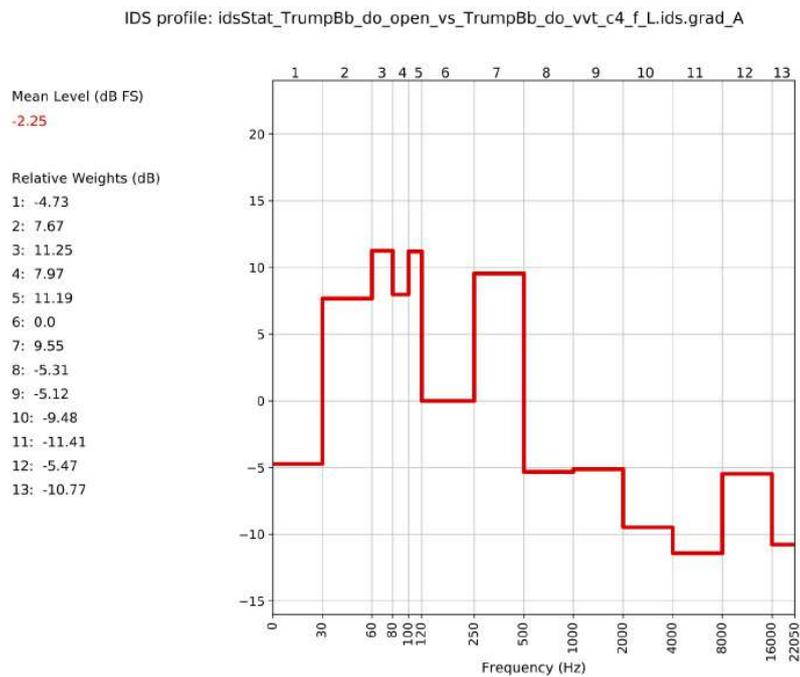
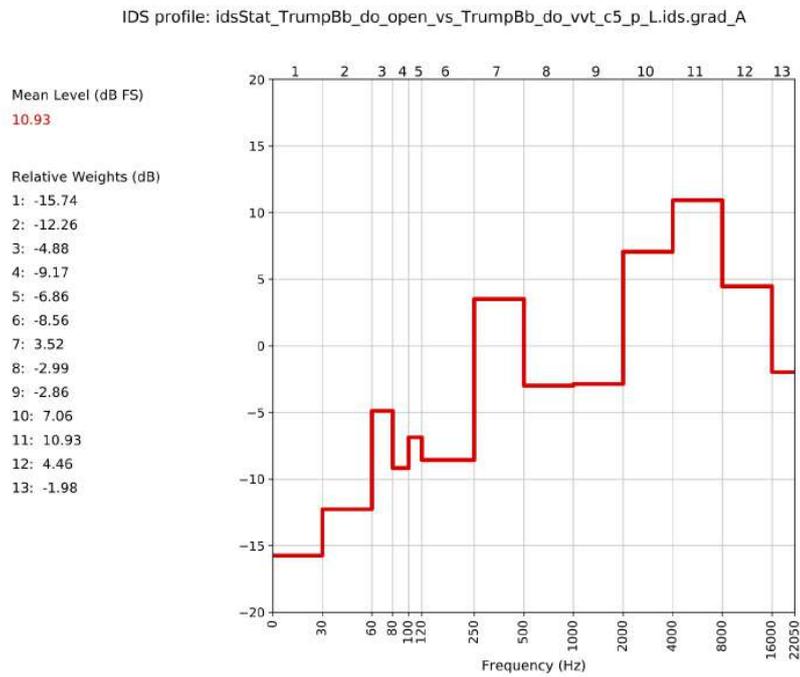


FIGURE 37 – Tracé du gradient son avec sourdine *vs* son sans sourdine pour une sourdine Velvet. En haut : do5, *piano* ; en bas : do4 *forte*.

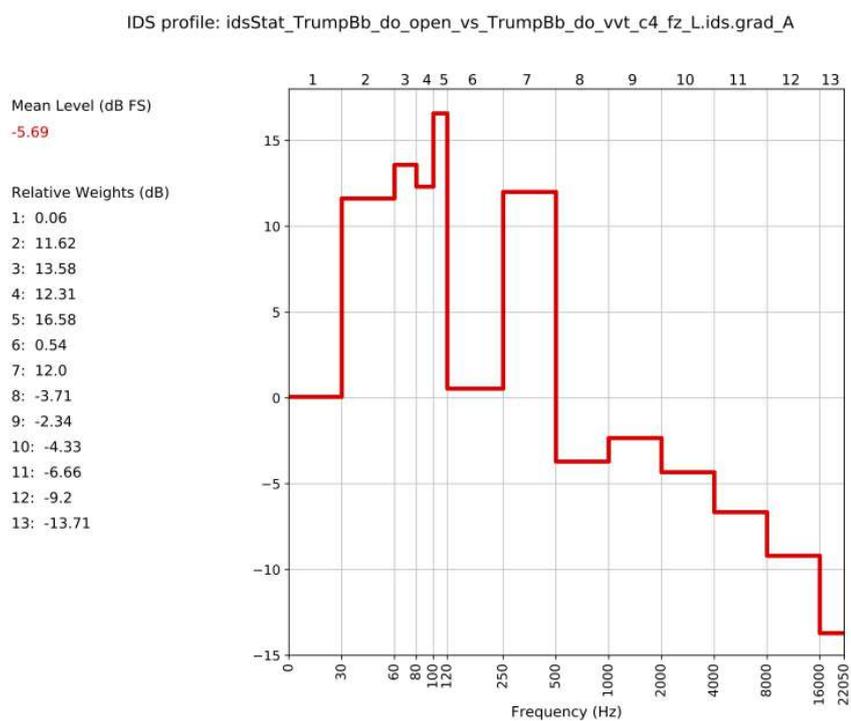


FIGURE 38 – Tracé du gradient son avec sourdine *vs* son sans sourdine pour une sourdine Velvet et jouant un do5 *piano*.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

De plus sa jouabilité est excellente puisqu'elle ne modifie que très peu le comportement vibratoire de la trompette.

Ces caractéristiques sont intéressantes mais l'atténuation globale est trop faible pour une utilisation de sourdine d'appartement.

2.3.8 Sourdine Plunger

À première vue la sourdine Plunger a un comportement relativement semblable à la sourdine Velvet. Faisant toutes les deux parties de la catégorie des sourdines extra-pavillonnaires, c'est ce que l'on pouvait attendre.

Quand la trompette bouchée d'une sourdine Plunger est jouée *piano* les hautes fréquences, entre 2 et 16 kHz, sont atténuées quel que soit le registre. La bande de 500 à 1000 Hz est renforcée, pour le sol 4 par exemple avec un gain de 8,4 dB. Les basses fréquences, en-dessous de 500 Hz, de ne sont pas ou peu atténuées (cf. Figure 39).

Quand on monte en niveau on suit les mêmes tendances mais les valeurs d'atténuation ou de gain augmentent. Pour le sol5 c'est-à-dire le registre aigu, joué *mezzo-forte*, les basses fréquences en-dessous de 250 Hz sont atténuées comme les fréquences au-dessus de 1 kHz et les fréquences entre 500 et 1000 Hz sont toujours renforcées. On retrouve ce comportement pour le do4 représenté Figure 39.

Aux nuances *forte* et *forzando* les tendances se confirment. Les basses fréquences, c'est-à-dire en-dessous de 250 Hz restent telles qu'elles pour la plupart des registres, quand les hautes fréquences, au-dessus de 2 kHz, sont atténuées.

On constate que lorsque l'on joue un do5 à fort niveau le comportement de la sourdine est différent : la bande de fréquence des médiums, et en particulier entre 1 et 2 kHz, est fortement atténuée alors que les hautes fréquences, entre 4 et 16 kHz sont renforcées. Les basses fréquences ne sont plus atténuées. Ce comportement est observable pour les nuances *forte* et *forzando* (cf. Figure 40).

Lien avec mon étude :

Le comportement étant proche de celui de la sourdine Velvet, il est assez intéressant aussi, en particulier pour l'atténuation dans les hautes fréquences. Le matériau textile (coton dans la Velvet et velours dans la Plunger) pourrait être intuitivement un des facteurs de l'atténuation des hautes fréquences.

Par contre, pour cette sourdine, le niveau moyen reste trop élevé pour envisager de partir sur cette sourdine pour élaborer le prototype.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

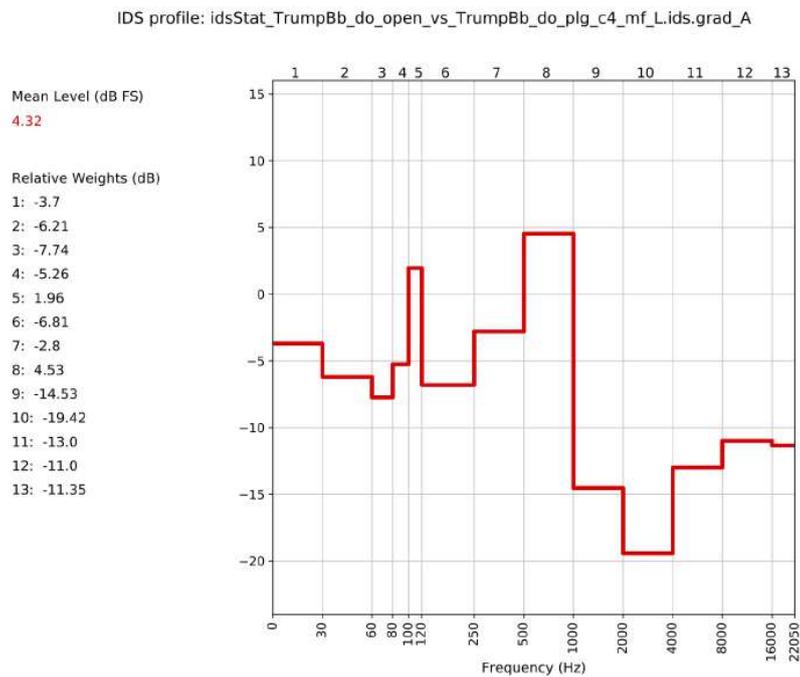
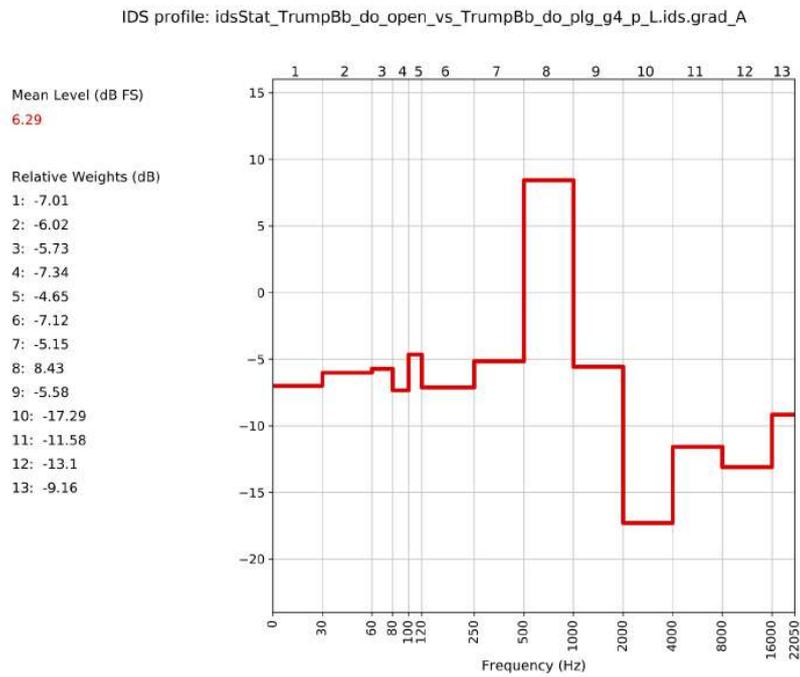


FIGURE 39 – Tracé du gradient son avec sourdine *vs* son sans sourdine pour une sourdine Plunger. En haut : sol4, *piano* ; en bas : do4 *mezzoforte*.

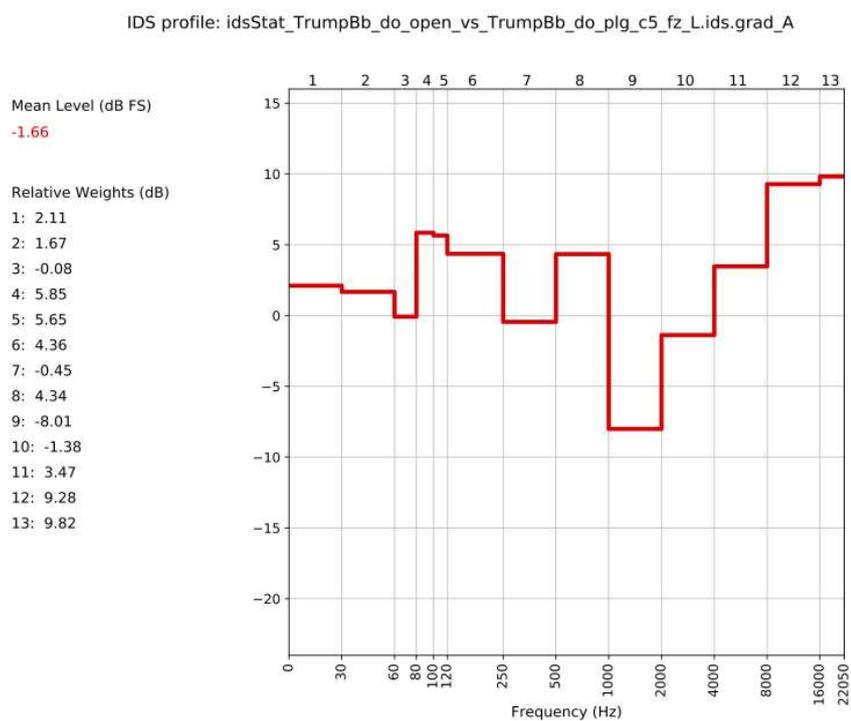


FIGURE 40 – Tracé du gradient son avec sourdine *vs* son sans sourdine pour une sourdine Plunger et jouant un do5 *forzando*.

2.4 Conception d'un modèle alternatif

2.4.1 Cahier des charges

Énergie et pavillon : L'étude des sourdines montre que les cas où l'atténuation est la plus grande sont ceux pour lesquels le minimum d'énergie est transmis au pavillon, et ce en raison des bagues de lièges ou de mousse qui épousent le fond du pavillon et perturbent la propagation de l'onde dans celui-ci.

Il me paraît donc essentiel de conserver cette propriété. Cependant c'est dans ces cas de figure que le trompettiste ressent une gêne au niveau de son masque. L'énergie non-rayonnée par le pavillon est renvoyée dans l'embouchure et dans le masque du trompettiste.

Il faudra donc trouver un compromis entre la transmission minimale de l'énergie et le confort du musicien.

Les fines lames de lièges que l'on trouve par exemple sur les sourdines sèches sont par exemple trop petites pour notre cahier des charges car on constate qu'elle n'ont pas un gros effet d'atténuateur. Leur rôle est donc uniquement de maintenir la sourdine fixée dans le pavillon par friction mais on pourrait tester l'effet de l'augmentation de la surface "bouchée" par ces lames de liège pour tester si cela introduit ou non un plus grande atténuation.

Matériau : Le métal semble assez inapproprié. Les sourdines réalisées en métal apportent un gain en niveau dans les hautes fréquences (au-dessus de 2 kHz). De plus on a vu dans le chapitre 2 que le fond, en résonnant, faisait apparaître un pic d'impédance parasite cf. section 2.1.3.

Le plastique semble être le plus approprié et il est également facile à travailler comparé au métal qui requiert plus d'outils.

D'un point de qualitatif il est clair que les facteurs de sourdines n'utilisent le plastique que pour les modèles bas de gamme peu onéreux et préfèrent des matériaux plus solides, métaux, ou plus nobles, bois, pour les modèles de sourdines haut de gamme plus couteux. Dans mon cas cette ségrégation n'a pas vraiment lieu d'être.

2.4.2 Fabrication

J'ai choisi pour des raisons pratiques de modifier des modèles existants pour arriver à proposer une alternative. Je n'ai en effet à ma disposition aucune structure industrielle qui permettrait de fabriquer une sourdine de A à Z.

Je réutilise donc une sourdine Yamaha PM7x, sourdine muette étudiée dans la section précédente qui est constituée à partir de plastique noir dense et de mousse pour la partie en contact avec le pavillon.

Au vu de ce qui émerge de l'étude des sourdines il m'a semblé qu'il fallait libérer une partie de l'énergie pour la laisser rayonner depuis le pavillon, quitte à ce que l'atténuation globale soit moins forte.

Ma première idée a donc consisté à modifier la mousse qui isole le pavillon. J'ai donc découpé des travées dans la bague de mousse pour obtenir au final un ensemble de bandes qui rappellent le liège des sourdines sèches.

La largeur des travées a été déterminée empiriquement en se basant sur le ressenti lors du jeu. En effet j'ai constaté comme l'expliquent Caussé et Sluchin [12] que la largeur, l'épaisseur, la nature des bandes de lièges ou de mousses qui couplent le pavillon à la sourdine ont une influence directe sur les pics d'impédance de la trompette, cf. Figure 41, et donc sur la jouabilité de l'instrument. En enlevant plus ou moins de mousse je fais varier la courbe d'impédance.

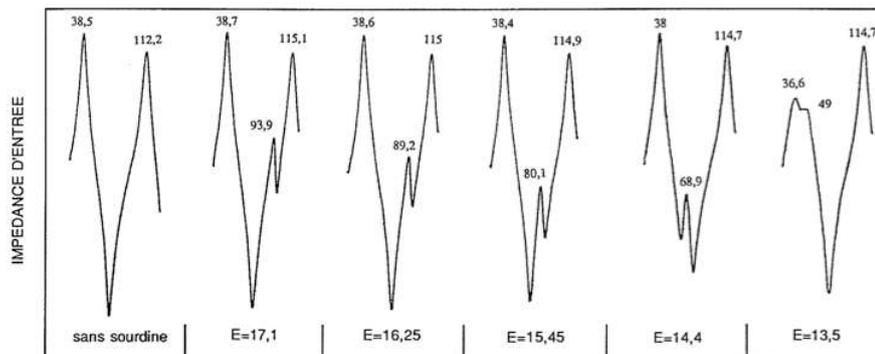


FIGURE 41 – Courbes montrant les deux premiers pics de l'impédance d'entrée d'un trombone bouché d'une sourdine sèche dont l'enfoncement, c'est-à-dire en réalité l'épaisseur des lames de liège, varie. La nature et la fréquence des pics varient également. D'après Caussé et Sluchin [12].

Quand la mousse est réduite de moitié l'instrument bouché est quasi-injouable : le premier pic n'est presque plus défini et se confond avec un nouveau pic. Dans les faits il est alors difficile de faire sonner le fondamental de la trompette. Finalement en enlevant une petite quantité de mousse, de l'ordre de 10%, la trompette est très légèrement faussée mais elle reste jouable et l'air est libéré.

Une seconde idée a consisté à percer le "couvercle" de la sourdine d'orifices pour laisser s'échapper de l'air. La sourdine telle qu'elle est vendue est percée d'un trou unique de 7 millimètres de diamètre. J'ai fait un essai sur une autre sourdine Yamaha PM7x. Le résultat est assez satisfaisant, la jouabilité de la trompette bouchée est inchangée mais le niveau sonore est cependant rehaussé et ce plus qu'avec la première idée de modification.

Il aurait été intéressant alors de compenser ce gain de niveau par l'ajout de matériau absorbant comme de la mousse devant les trous, mais par manque de temps je me suis contenté de la première modification.

Pour compenser la perte d'atténuation due à la modification de la sourdine du commerce plusieurs idées ont émergé.

Contrairement à ce que je pensais intuitivement, la sourdine Yamaha de série est creuse. Elle ne contient pas de labyrinthe acoustique ni de matériau absorbant mais seulement un petit tuyau courbe qui semble être là pour "guider" l'onde vers l'évent (cf. Figure 42).

Une première idée a donc consisté à remplir la sourdine d'un matériau absorbant les hautes fréquences, du coton par exemple ou de la mousse. D'un point de vue pratique seul le coton peut être introduit dans la sourdine sans l'ouvrir définitivement en deux.

Une deuxième idée a consisté à adjoindre à la sourdine muette modifiée une sourdine externe pour ajouter leurs effets. D'un point de vue pratique, comme la sourdine Plunger nécessite une main pour la tenir, on a préféré la sourdine Velvet qui est elle fixée au pavillon.

Dans le chapitre précédent nous avons pu observer l'effet de la sourdine Velvet sur le son de la trompette, page 56. L'atténuation des hautes fréquences est d'autant plus intéressante que la modification de la sourdine Yamaha a, à l'oreille, assez peu changé sa réponse spectrale que l'on a pu voir page 54. En effet, cette sourdine atténue en général assez peu les aigus.



FIGURE 42 – Sourdine Yamaha ouverte dévoilant la cavité intérieure, le tuyau courbé et au milieu, traversant la sourdine de part en part, les conducteurs reliant le capteur à la connectique.

Des écoutes mettent tout de suite en évidence l'inefficacité de cette méthode puisque la sourdine Velvet n'apporte pas de modification sensible à la réponse de la trompette.

Je suis donc revenu à la première idée pour finalement apporter deux modifications à la sourdine du commerce :

- “percée de travées” : on perce des travées dans la bague de mousse pour libérer de l'énergie ;
- “ajout de matière” : on ajoute du matériau absorbant les hautes fréquences dans la cavité interne de la sourdine.

Remarque sur la subjectivité des sensations du trompettiste Il aurait été intéressant de quantifier à l'aide de tests subjectifs l'effet de chaque sourdine sur les sensations de jeu du trompettiste mais le temps imparti pour le mémoire et les choix réalisés ne m'ont pas permis de réaliser ces tests.

Il s'agirait de dégager des variables dépendantes comme la pression “subie” par l'instrumentiste ou le poids et de les confronter aux variables indépendantes que

sont les différentes configurations de sourdines pour un ensemble de sujets.

Les conclusions permettraient de juger par exemple de la jouabilité de mon modèle alternatif.

Ici ces effets sur le ressenti du trompettiste seront issus seulement de mon expérience ou extrapolés à partir de ce que l'on sait du phénomène vibratoire de la trompette.

2.4.3 Caractérisation du modèle alternatif de sourdine

J'ai pratiqué pour le modèle alternatif de sourdine une campagne de mesures similaires à celle menée dans la section précédente. Le nom des mesures respecte la convention introduite dans la Table 1 (page 32).

J'ai choisi pour ces mesures deux extraits musicaux que j'ai répété 6 fois pour chaque configuration. Le premier extrait est issu du répertoire baroque (donc plus largement de la musique dite classique), c'est un extrait d'une sonate pour flûte et piano de Bach arrangé pour la trompette [23]. Le second extrait est issu du répertoire jazz, c'est un extrait de la partition de trompette d'un arrangement pour Big Band de la pièce Cheesecake écrite par le saxophoniste Dexter Gordon [24].

Les fichiers de mesures sont donc moins nombreux mais plus longs et contiennent une grande plage dynamique et tous les registres.

J'ai pu calculer puis tracer les gradients son débouché *vs* son bouché pour la sourdine avec la première modification puis pour la sourdine avec les deux modifications, toujours à l'aide des outils d'analyse IDS.

Pour rappel deux tracés représentatifs des tendances de l'impact de la sourdine muette sur le son de la trompette sont présentés Figure 43, avec cette fois comme stimuli les extraits de musique et non plus les notes.

Les tracés résultants pour l'extrait de musique classique sont présentés Figure 44 pour la première modification "percées de travées" et pour les deux modifications "percées de travées" et "ajout d'absorbant". Les tracés résultants pour l'extrait de musique jazz sont présentés Figure 45 pour la première modification "percées de travées" et pour les deux modifications "percées de travées" et "ajout d'absorbant".

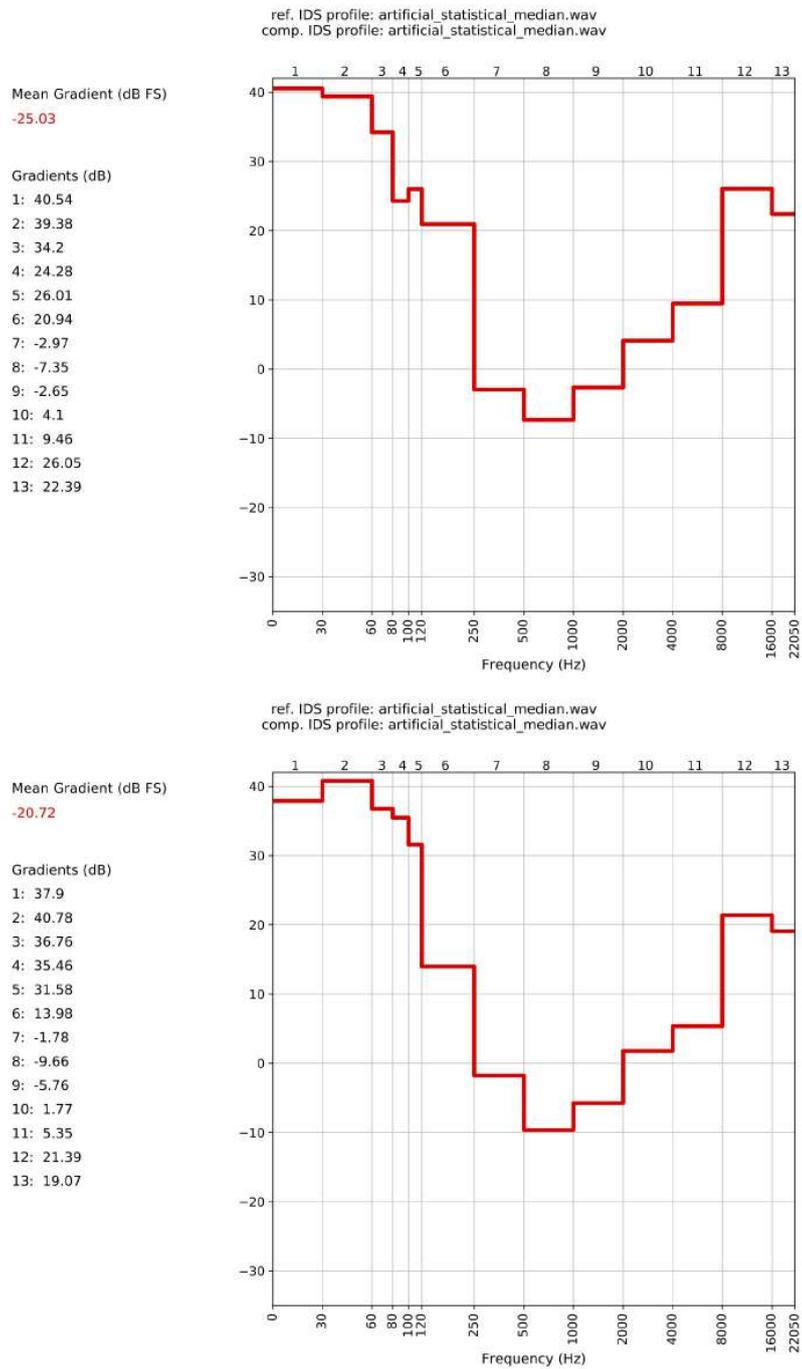


FIGURE 43 – Tracé du gradient son avec sourdine muette *vs* son sans sourdine pour l'extrait de musique classique (en haut) et jazz (en bas).

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

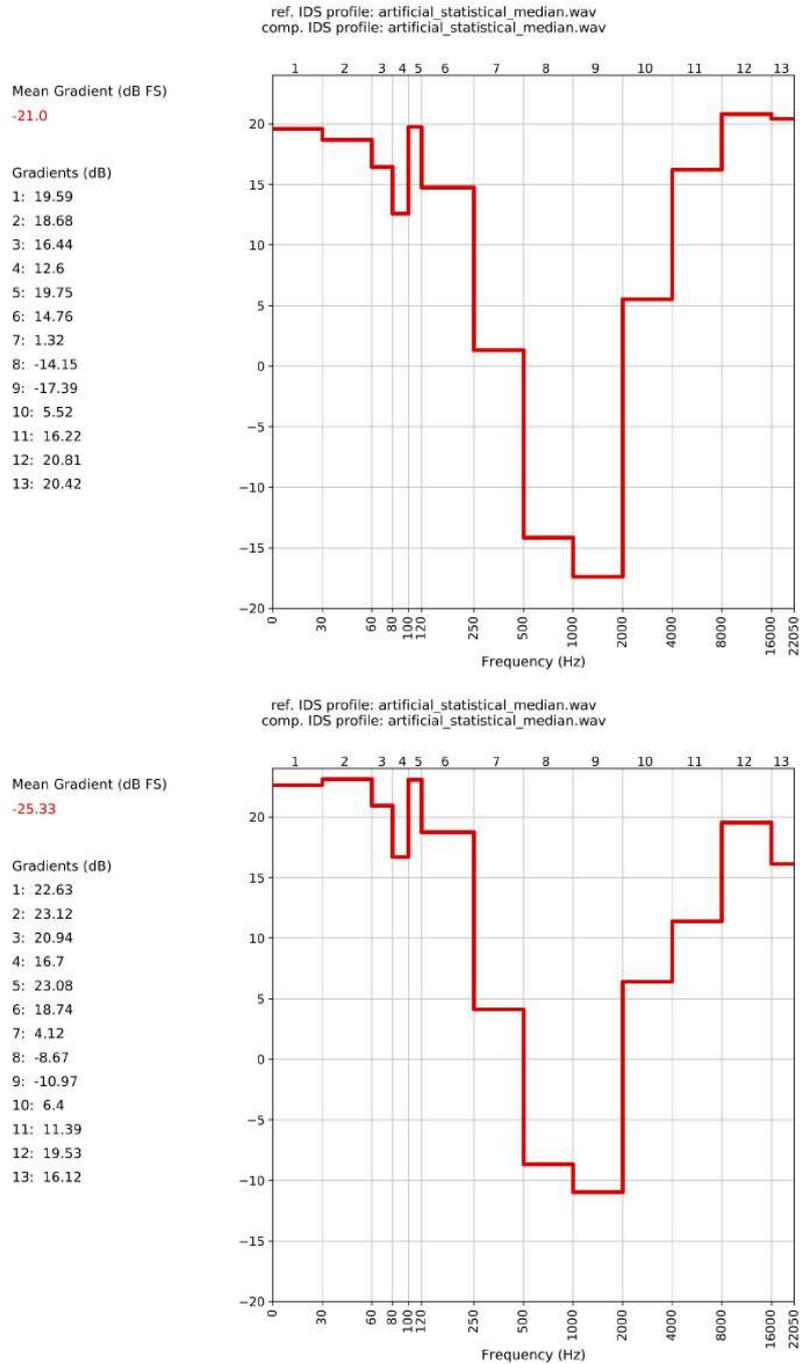


FIGURE 44 – Tracé du gradient trompette débouchée *vs* trompette bouchée par la sourdine muette avec la première modification ”perce de travées” (en haut) et avec les deux modifications ”perce de travées” et ”ajout d’absorbant” (en bas), pour l’extrait de musique classique.

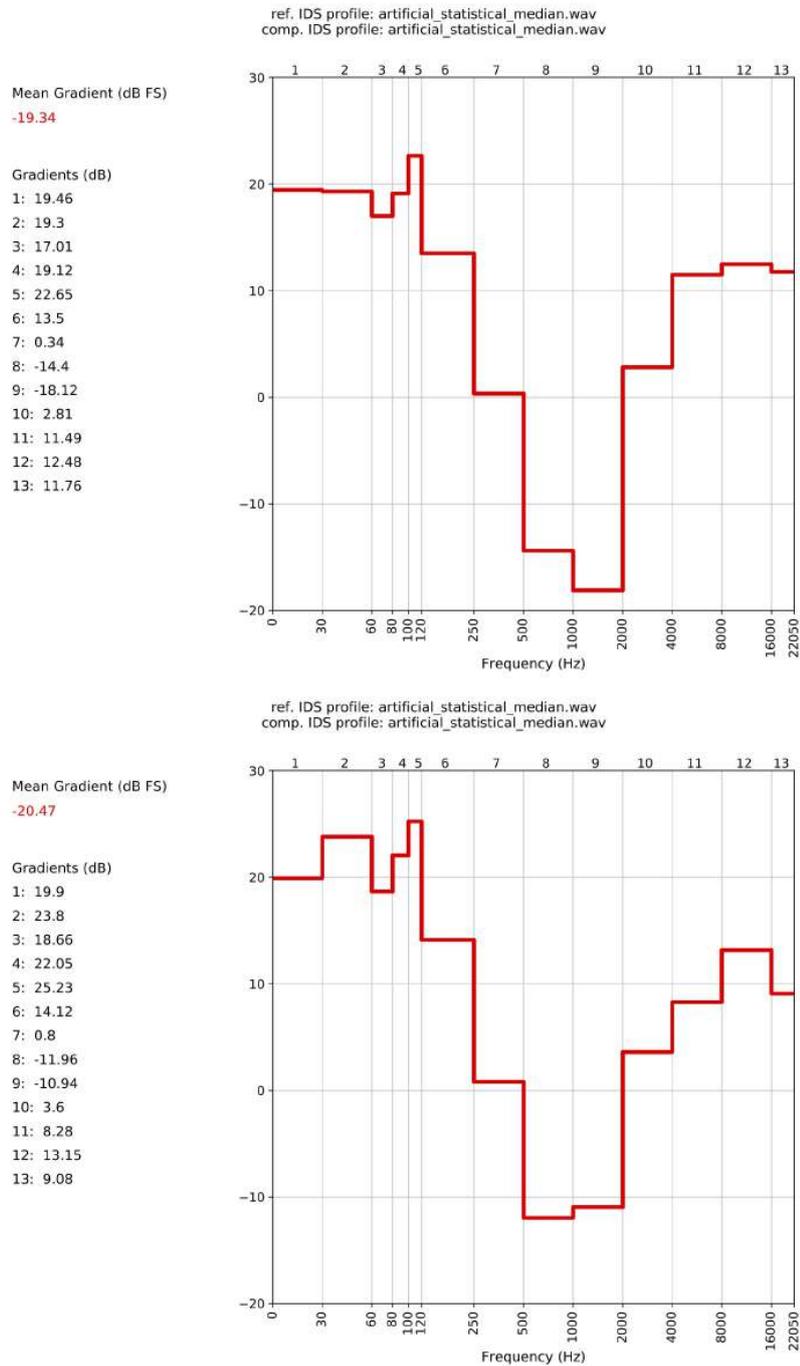


FIGURE 45 – Tracé du gradient trompette débouchée *vs* trompette bouchée par la sourdine muette avec la première modification ”perce de travées” (en haut) et avec les deux modifications ”perce de travées” et ”ajout d’absorbant” (en bas), pour l’extrait de musique jazz.

Lors de la comparaison avec le modèle original de sourdine, on constate que l'atténuation obtenue est moins importante, comme attendu, pour les deux modèles modifiés et que c'est le prototype avec les deux modifications qui introduit l'atténuation la plus conséquente.

Entre les deux modèles modifiés les différences sont ténues. On peut noter un poids différent dans la bande de 4 à 8 kHz pour l'extrait de musique classique par exemple, avec 16 dB pour la première et 11 dB pour la deuxième, ce qui semble corroborer l'intuition que le coton réduirait le poids des aigus dans la balance spectrale (cf. Figure 44).

Cependant pour la bande de 500 à 1000 Hz, qui est celle la plus atténuée par le modèle original, les résultats sont peu convaincants. Si la première sourdine modifiée montre un poids relatif de -14 dB pour l'extrait jazz, la deuxième sourdine modifiée montre un poids relatif de -12 dB (cf. Figure 45). L'atténuation semble donc moins forte dans cette bande de fréquences.

Si les sensations de jeu sont meilleures avec la sourdine modifiée l'effet d'atténuation est lui moins efficace, comme attendu. On peut noter cependant que le modèle avec les deux modifications reste, derrière la sourdine muette du commerce, la sourdine apportant la plus grande atténuation globale.

L'intérêt de la deuxième modification "ajout d'absorbant" semble discutable. Elle n'apporte rien de satisfaisant dans la balance spectrale, au contraire, même si elle contribue à abaisser le niveau global.

Les sensations de jeu étant de plus dégradées par cette modification, elle ne paraît pas satisfaisante. Au final, on décide de ne retenir que la première modification, "percée de travées", qui n'introduit pas des modifications trop brutales de la balance spectrale.

2.5 Conclusions locales

Nous avons, dans ce chapitre, commencé par préciser plusieurs phénomènes physiques en jeu lorsqu'une trompette est jouée et notamment lorsqu'elle est jouée bouchée.

Dans un deuxième temps nous avons exposé le protocole de mesure et d'analyse mis en œuvre pour caractériser différents modèles de sourdines du commerce avant de présenter dans un troisième temps les résultats de cette analyse.

Finalement, dans la quatrième partie du chapitre, nous avons étudié la conception, la réalisation ainsi que la caractérisation d'un modèle de sourdine muette alternatif respectant mieux les sensations du trompettiste.

Le chapitre suivant est dédié à la restitution du son de la trompette au musicien et au traitement éventuel à appliquer au signal prélevé en amont du pavillon.

Chapitre 3

Restitution du son au trompettiste

Dans le chapitre précédent j'ai modifié une sourdine muette du commerce pour la rendre plus facilement jouable tout en gardant une atténuation raisonnable.

Le modèle de sourdine que j'utilise est équipé d'un capteur à électret qui prélève le son en amont du pavillon quand la trompette est bouchée. Le signal est récupéré grâce à la connectique en jack 3,5 mm sur le couvercle de la sourdine.

La première partie de ce chapitre est consacrée à l'utilisation de ce capteur et la caractérisation du signal prélevé. Plusieurs questions se posent alors. Quelle est la balance spectrale de ce signal ? À quel point est-il proche du son de la trompette débouchée ? Que restituer à l'instrumentiste ?

Dans la deuxième partie nous avons cherché à re-synthétiser un son de trompette débouchée en traitant le signal fourni par la sourdine.

Dans une troisième partie nous nous sommes penchés sur l'idée d'un son restitué au plus proche de ce que le trompettiste entend, et non le spectateur.

Finalement dans une quatrième partie nous avons étudié la possibilité de proposer plusieurs algorithmes de re-synthèse pour différents son de trompette bouchée voire un algorithme modifiable par l'utilisateur qui ferait du couple sourdine/algorithme un processeur d'effet pour trompette.

3.1 Utilisation du capteur interne et tracé du profil IDS du son en amont du pavillon

Le capteur interne de la sourdine du commerce Yamaha PM7x (cf. Figure 46) est un capteur à électret. Le signal électrique produit par un capteur à diélectrique permanent comme un capteur à électret étant très faible il doit être pré-amplifié dans la capsule. C'est pourquoi les capsules microphoniques à électret contiennent un préamplificateur qui doit être alimenté par une tension de l'ordre du Volt.

La nature des ondes et les pressions extrêmes auquel le capteur est confronté m'ont orienté vers un capteur à électret. Finalement ce qui m'a convaincu c'est le fait de mesurer aux bornes du préamplificateur fourni avec la sourdine par Yamaha une tension continue de 3 volts. En effet, c'est une valeur caractéristique d'alimentation du préamplificateur intégré d'une capsule microphonique à électret [25].

Le modèle alternatif modifié étant à l'origine un modèle de sourdine Yamaha PM7x il est équipé de ce capteur et je l'utilise donc dans la suite du travail.



FIGURE 46 – Capteur équipant la sourdine Yamaha PM7x.

Comme dit plus haut la capsule a besoin d'être alimentée pour délivrer un signal utilisable. J'ai donc en premier lieu construit un préamplificateur capable de l'alimenter à partir de documents et avec l'aide de Mohammed Eллиq, professeur d'électronique à l'école. Le schéma du préamplificateur est présenté Figure 47.

J'ai mené une campagne de mesures à partir des signaux fournis par ce capteur. Ces mesures rendent donc compte du son en amont du pavillon.

À l'aide des outils d'analyse IDS j'ai tracé le profil de densité spectrale du son de la trompette en amont du pavillon, donc sans rayonnement.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

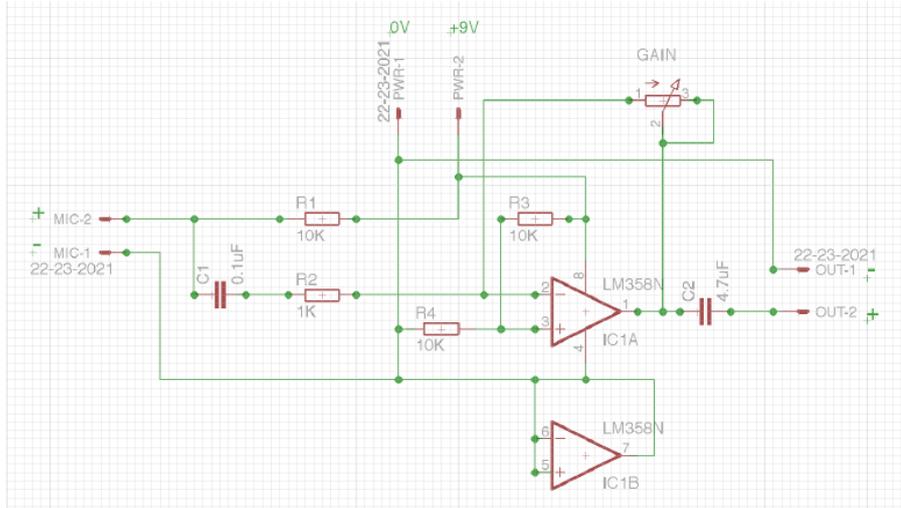


FIGURE 47 – Schéma du préamplificateur.

Au vu de l'importance du pavillon dans la genèse du son de la trompette, il est normal de constater que le signal prélevé en amont du pavillon présente un profil de densité spectrale différent de celui d'une trompette bouchée (cf. Figure 48). Dans la suite de ce chapitre on s'intéresse au traitement à appliquer au son capté en amont du pavillon et à sa restitution à destination du trompettiste.

3.2 Re-synthèse d'un son de trompette ouverte

3.2.1 Caractérisation

Dans le but de restituer au trompettiste un son le plus réaliste possible, le signal capté en amont du pavillon doit être traité pour se rapprocher, au moins fréquemment, du son de la trompette débouchée.

Le protocole adopté pour cette opération est le suivant.

On commence par calculer le gradient IDS entre le son capté en amont du pavillon bouché par la sourdine muette étudiée et le son capté pour la trompette débouchée (cf. Figure 48).

IDS gradient file version	0.91	
Wave file path	Open_classic_i32_L/	TrumpBb_do_pctmod1_classic/
Wav file name	artificial_statistical_median.wav	artificial_statistical_median.wav
Number of channels	1	
Number of samples	0	0
Sample rate (Hz)	44100	
Bits per samples	32	32
Analysis type	Audio	
Filter size	44263	44263
Subband relative energy gradient (dB):		
Channel name	1	
0-30	32.94	
30-60	23.38	
60-80	30.56	
80-100	23.52	
100-120	25.92	
120-250	18.63	
250-500	9.21	
500-1000	4.95	
1000-2000	-6.33	
2000-4000	-15.96	
4000-8000	-18.34	
8000-16000	-12.28	
16000-22050	-23.47	
Channel energy gradient (dB FS)	5.79	

FIGURE 48 – Tableaux de valeurs du gradient son débouché *vs* son prélevé en amont du pavillon quand le trompette est bouchée avec le modèle alternatif de sourdine ayant subi la première modification “percée de travées” et pour l’extrait de musique classique.

Les poids relatifs de ce gradient IDS nous indiquent les sous-bandes présentant un excès ou un défaut de présence dans la balance spectrale (cf. Figure 48). Pour se

rapprocher du son en sortie de trompette sans sourdine il faut donc utiliser le filtre correspondant à l'inverse du gradient IDS, donc inverser le signe des poids relatifs pour chacune des sous-bandes. Cela revient idéalement à supprimer les excès comme les défauts d'énergie locaux.

Pour obtenir le filtre de correction, il suffit de calculer le signal correspondant à la combinaison linéaire des filtres d'analyse où les coefficients correspondent aux valeurs linéaires des opposés des poids relatifs constituant le gradient IDS.

On obtient la version corrigée du signal de trompette par filtrage par le filtre de correction.

Intéressons-nous d'abord aux résultats des mesures effectuées en jouant un extrait de musique classique. Le tracé du gradient est présenté Figure 49.

La première observation que l'on peut faire est que les hautes fréquences sont grandement atténuées. Plus la fréquence augmente, plus le poids relatifs diminue. Ainsi pour la bande de 500 à 1000 Hz on est à peu près à l'équilibre avec un léger gain de 5 dB, mais pour la bande de 1 à 2 kHz l'atténuation apparaît avec un poids relatif de -6 dB. La courbe descend jusqu'à atteindre -16 dB pour la bande de fréquences entre 4 et 8 kHz. Finalement dans l'extrême-aigu, entre 16 et 22,05 kHz l'atténuation est de -23 dB.

A contrario dans le grave plus la fréquence baisse plus le gain augmente. La bande de fréquences comprise entre 250 et 500 Hz présente déjà un poids relatif de 9 dB, et on atteint 31 dB pour la bande de 60 à 80 Hz.

Le tracé du gradient son débouché *vs* son intra-pavillonnaire pour l'extrait de musique jazz est également présenté dans la Figure 49.

La courbe a la même allure que pour l'extrait de musique classique (cf. Figure 49). Les fréquences graves sont renforcées tandis que les fréquences aigües sont atténuées.

La principale différence que l'on peut noter entre les deux courbes se trouve dans les basses fréquences : la courbe de l'extrait jazz montre des poids relatifs plus grands que la courbe de l'extrait classique. Par exemple dans la bande de 250 à 500 Hz où l'extrait jazz présente un poids relatif de 4 dB alors que l'extrait classique présente un poids relatif de 9 dB. De la même façon dans la bande de 30 à 60 Hz les extraits

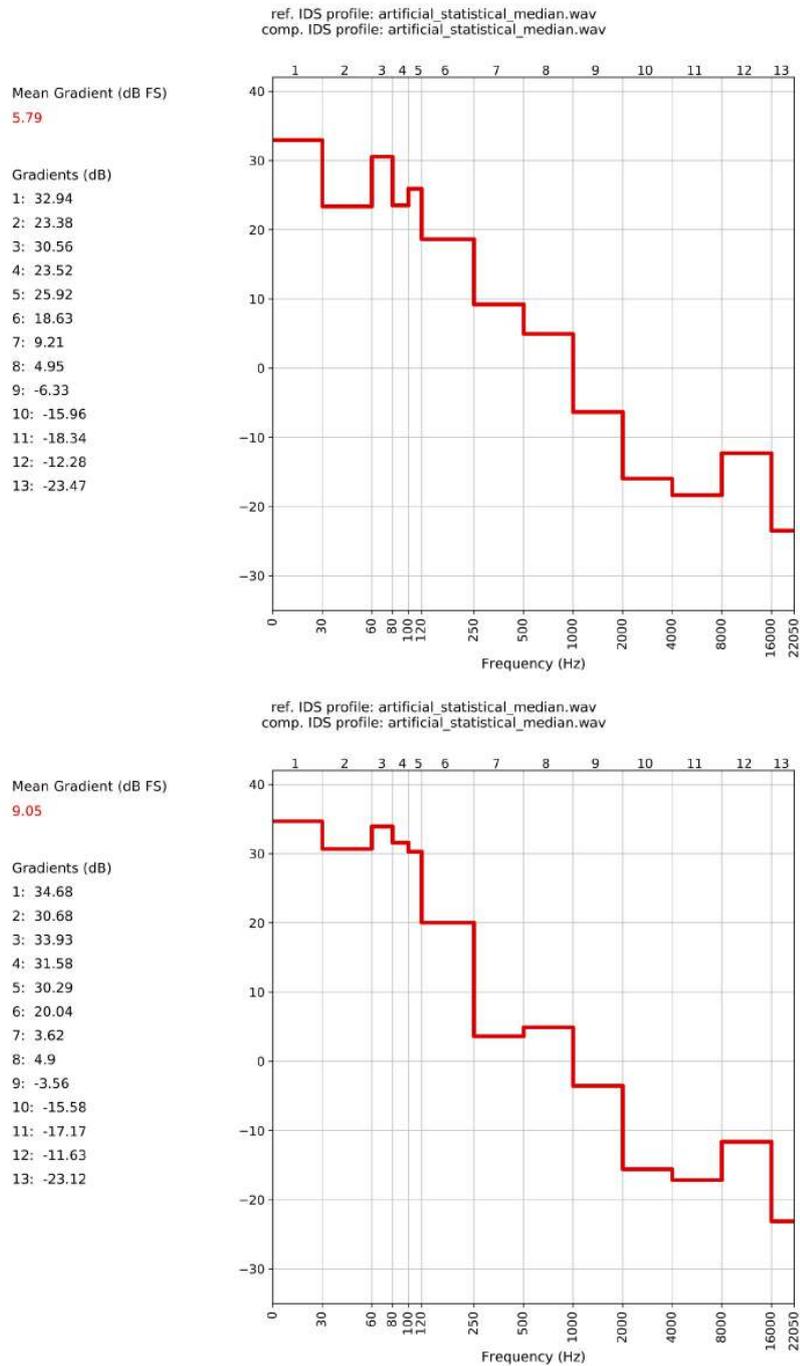


FIGURE 49 – Tracé du gradient son débouché *vs* son prélevé en amont du pavillon quand le trompette est bouchée avec le modèle alternatif de sourdine ayant subi la première modification "percée de travées". En haut : extrait de musique classique ; en bas : extrait de musique jazz.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

jazz et classique présentent respectivement un poids relatif de 31 et 23 dB, et la tendance se retrouve dans les bandes de 80 à 250 Hz.

Même si les deux courbes présentent globalement une allure similaire il serait intéressant de pouvoir adapter le traitement au style de l'œuvre jouée en construisant par exemple une banque de jeu de filtres correspondant chacun à un style (classique, jazz, rock etc.).

3.2.2 Principes d'implémentation pour les traitements

Pour implémenter le traitement, on peut opter pour une implémentation au sein de Pure Data, logiciel open source, mais on sera limité par la longueur des réponses impulsionnelles permettant un filtrage en temps réel.

Idéalement, il faudrait réaliser une implémentation temps réel de la convolution dans un langage permettant une compilation comme les langages C ou C++.

Mais, même dans ce cas, il faudrait certainement opter pour des filtres d'analyses, et donc un filtre de correction, ayant une longueur plus courte que les filtres d'analyse utilisés par l'IDS_Analyzer : des filtres à réponse impulsionnelle finie (RIF) à phase nulle (donc n'apportant aucune modification de la phase dans la sous-bande), de longueur légèrement supérieure à la seconde quelle que soit la fréquence d'échantillonnage. Il va donc falloir déterminer, selon la solution retenue pour l'implémentation temps réel de la convolution, la longueur maximale permise pour le filtre de correction, puis, tester si cette longueur maximale de filtre permet de proposer une correction satisfaisante pour les utilisateurs.

Dans l'intervalle, on peut simuler le traitement en temps différé sous Matlab ou Python pour avoir une idée du résultat qui pourra être atteint dans quelques années quand les capacités de traitement des ordinateurs ou des cartes de traitement auront suffisamment progressé pour permettre l'utilisation des filtres de correction "optimaux". Il serait d'ailleurs intéressant d'étudier quelles sont les conditions minimales, concernant le design des filtres d'analyse (largeur de la bande de transition et niveau d'atténuation relative en bande atténuée), pour offrir une correction satisfaisante.

On peut aussi modifier le re-synthétiseur IDS, sous Pure Data, fourni avec les IDS Tools, pour écouter ce que donnerait le traitement en temps réel avec les filtres d'analyse et les corrections de poids (poids opposés à ceux du gradient IDS) à partir des signaux en sous-bandes. Avec cette version modifiée du re-synthétiseur IDS, on pourra même écouter et tester ce que donnerait la modification en temps réel de la correction, c'est-à-dire quand on modifie en temps réel les corrections introduites pour chacune des sous-bandes pour constituer un son qui plait mieux au trompettiste.

A partir des corrections modifiées, on est alors en mesure de calculer un filtre de correction personnalisé et de recourir à un convolveur temps réel pour appliquer en temps réel la correction au son fourni par la sourdine muette modifiée, ce qui nous

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

ramène à la question de l'implémentation temps réelle du filtrage par un filtre de correction aussi proche que possible du filtre de correction personnalisé.

L'implémentation effective de ces traitements sera présentée et discutée lors de la soutenance.

3.3 Re-synthèse d'un son de trompette à partir de mesures binaurales

Dans la section précédente nous avons indiqué les pistes considérées actuellement pour re-synthétiser un son de trompette ouverte à partir d'un signal prélevé en amont du pavillon.

Nous avons pris comme signal de référence, comme son de référence, à re-synthétiser le son de la trompette ouverte. Dans la réalité ce n'est pas ce son qu'entend le trompettiste quand il joue. D'abord parce que la trompette est un instrument directionnel et que le trompettiste se tient derrière le pavillon lorsqu'il joue. Il n'entend donc pas la même chose que le spectateur qui, en général, se trouve lui face à l'instrument (cf. Figure 50).

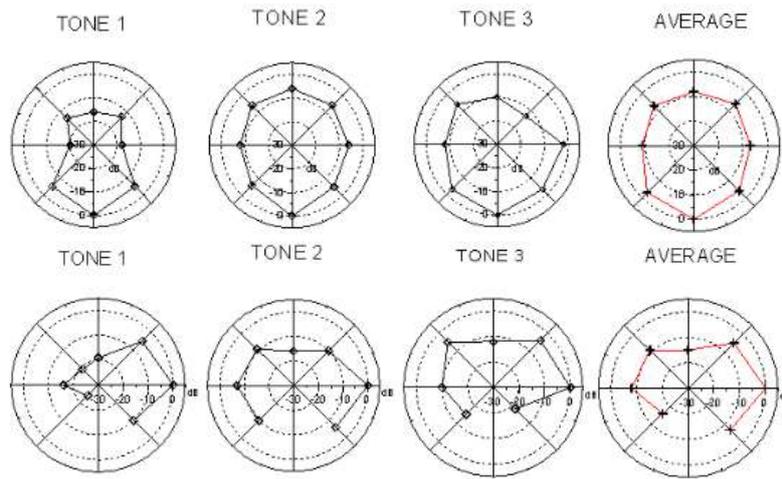


FIGURE 50 – Diagramme de directivité de la trompette dans l'axe horizontal (en haut) et vertical (en bas) pour trois registres différents (grave, médium, aigu) et en moyenne sur toute la tessiture. Le pavillon est dirigé vers le bas pour l'axe horizontal et vers la droite pour l'axe vertical. D'après Otondo, Rindel, Caussé, Misadaaris et De La Cuadra [26].

De plus le corps de l'instrumentiste apporte sa propre contribution à la perception du son par le trompettiste. En effet, comme on peut en faire l'expérience avec la voix, les vibrations de la boîte crânienne ou du thorax, par exemple, modifient le spectre de ce qu'entend le musicien.

Sourdine muette pour trompette, vers un modèle plus adapté

Cette constatation m'a poussé à envisager un second traitement à appliquer au signal prélevé avant le pavillon pour re-synthétiser non pas le son de la trompette débouchée entendue du point de vue du spectateur mais de la trompette débouchée entendue du point de vue du trompettiste.

Le protocole est identique, sauf que l'on part du gradient entre le son capté en amont du pavillon et le son que le trompettiste entend lorsqu'il joue.

J'ai mené une campagne de mesures binaurales afin de constituer un corpus de mesures du son que le trompettiste entend lorsqu'il joue. Pour ce faire j'ai utilisé des capsules microphoniques à électret DPA 4060 placées dans mes propres oreilles, à fleur du pavillon, pendant que je jouais (cf. Figure 51).



FIGURE 51 – Capsule DPA 4060 en configuration de prise de son binaurale.

Les résultats de cette re-synthèse seront présentés également à la soutenance.

Le temps imparti ne l'a pas permis mais il aurait été intéressant de mener des tests subjectifs sur des sujets trompettistes pour déterminer les préférences des musiciens eux-mêmes. Si on leur donne le choix, préfèrent-ils entendre leur trompette comme ils l'entendent débouchée ou plutôt ce qu'entendent les spectateurs ?

3.4 Conclusions locales

Ce chapitre est dédié à la re-synthèse et la diffusion d'un son de la trompette satisfaisant en partant du signal prélevé en amont du pavillon.

Je me suis d'abord intéressé à la technologie du capteur utilisé et à la faisabilité du prélèvement d'un signal en amont du pavillon avant de présenter le protocole et les outils nécessaires pour mettre en œuvre la correction envisagée.

Finalement j'ai exploré l'idée de re-synthétiser un son plus proche de ce que le trompettiste entend réellement quand il joue sans sourdine en utilisant des mesures binaurales effectuées à l'aide de capsules microphoniques compactes placées dans mes oreilles.

A l'issue de la discussion de ces deux options, correction du signal capté et ajout de la diffusion binaurale, il s'avère nécessaire de trouver une solution pour mettre en œuvre ces deux solutions en temps réel et ce avec le minimum de compromis sur la qualité du son offert au trompettiste, donc d'étudier les solutions pour réaliser des convolutions en temps réel mettant en scène des filtres avec des réponses impulsionnelles très longues (potentiellement de longueur supérieure à une seconde).

Une autre perspective de travail consisterait à mettre sur pied et réaliser des tests subjectifs avec des trompettistes afin de déterminer leurs préférences de correction : se satisfont-ils des corrections objectives ou préfèrent-ils amender systématiquement les corrections proposées ? Mais, ce travail nécessite au préalable une réponse satisfaisante à la question de la convolution en temps réel.

Conclusion générale

La première partie de ce mémoire a permis, après une présentation de l'instrument, de souligner les phénomènes physiques importants dans la genèse du son de la trompette. J'ai également présenté, dans ce chapitre, les différents modèles de sourdines existants pour la trompette.

J'ai ensuite, dans un deuxième chapitre, constitué un large corpus de données sur différents modèles de sourdines pour trompette. Ce corpus m'a permis d'analyser et de caractériser l'effet objectif de chacune de ces sourdines sur le son de la trompette.

Le corpus de données peut être réutilisé pour d'autres études et analyses sur les sourdines pour trompette, comme les liens entre balance spectrale du son de la trompette bouché avec une sourdine et l'appartenance de cette sourdine à l'une ou l'autre des catégories définies au premier chapitre.

De plus, on dispose d'un protocole (des conventions de hommage aux outils d'analyse) qui permet d'envisager de travailler sur la caractérisation d'autres sourdines pour d'autres instruments à vent (par exemple le trombone ou le cor d'harmonie) ou bien d'autres instruments de musique (étude en cours sur les guitares classiques avec Charles Besnainou), ainsi que les dispositifs ou installations sonores comme a pu le démontrer le projet SABRE (Salles Acoustique - Bases de Référence) porté par Laurent Millot dans le cadre du Labex Arts-H2H au sujet de la caractérisation d'installations sonores.

La caractérisation des différentes sourdines étudiées a mené à l'établissement d'un cahier des charges pour proposer un modèle de sourdine muette alternatif. Ce modèle alternatif a pour objectif d'être plus facilement jouable que celui du commerce.

Le prototype de sourdine a été réalisé à partir d'un modèle du commerce que j'ai modifié.

De la caractérisation des sourdines du commerce j'ai déduit deux modifications à apporter à la sourdine muette pour améliorer sa jouabilité. La première modification avait pour but de libérer une partie de l'énergie que le pavillon rayonne quand la trompette est débouchée et qui revient dans les lèvres du trompettiste quand la trompette est bouchée. Cette modification a consisté en l'ouverture de travées le long de la bague de mousse isolante que l'on trouve sur le col de la sourdine. Cette modification s'est montrée efficace et satisfaisante.

J'ai essayé une alternative qui consistait à percer des trous sur le couvercle de la sourdine mais le niveau sonore rayonné de la pression de la trompette bouchée était alors trop important. Cette deuxième modification avait pour but d'atténuer une partie des hautes fréquences que la première modification avait pu ramener dans le spectre global de la trompette bouchée.

J'ai alors d'abord essayé d'adjoindre à la sourdine muette modifiée une sourdine Velvet pour profiter de l'atténuation des hautes fréquences que cette dernière apporte, mais, à l'écoute le résultat ne paraissait pas satisfaisant.

J'ai alors essayé une alternative consistant à insérer du coton dans la sourdine muette pour absorber les hautes fréquences. Comme cette modification apportait une légère atténuation supplémentaire mais dégradait sensiblement les sensations de jeu, j'ai donc choisi de ne conserver que la première modification : "ouverture de travées".

J'ai ensuite caractérisé ce modèle alternatif pour conclure quant à l'efficacité globale ou non des modifications apportées et avoir des résultats objectifs en vue du design du principe de correction du son capté avec le capteur fourni avec la sourdine muette.

S'agissant du prototype, il serait intéressant de voir s'il est possible de le produire en petite série afin de valider et finaliser avec d'autres trompettistes son design. Ceci passerait probablement d'abord par une tentative pour approcher la société Yamaha puisque le prototype correspond à une modification de leur modèle de sourdine muette.

On pourrait aussi poursuivre l'étude de l'atténuation du son de la trompette en se penchant par exemple sur la conception d'une trompette d'appartement qui produirait des niveaux de pression suffisamment bas pour être jouée en appartement tout en conservant une jouabilité proche de la trompette sans sourdine.

Dans ce deuxième chapitre, je me suis rendu compte de l'intérêt de disposer d'une carte d'acquisition et non d'une interface audio comme ce fut le cas ici. En effet, l'interface audio ne permet pas d'accéder aux phénomènes physiques à l'œuvre pour des fréquences inférieures à 20 Hz, or, l'observation des différents portraits ou gradients IDS calculés et tracés au cours du travail semble indiquer que les phénomènes physiques dans la sous-bande 0-30 Hz ne sont pas négligeables. Aussi, avec une carte d'acquisition, on pourrait s'intéresser aux phénomènes physiques en amont du pavillon à condition de disposer d'un moyen pour calibrer le capteur et voir si l'observation de ce qui se passe dans les très graves fréquences est ou non de nature à influencer les hypothèses de modélisation physique pour la trompette.

Finalement, dans un troisième chapitre, j'ai abordé la question de la correction du son prélevé en amont du pavillon à l'aide du capteur intégré à la sourdine muette pour le restituer au trompettiste. J'ai présenté le principe du protocole et des outils à utiliser tant pour la correction que pour la diffusion éventuelle en binaural.

La mise en œuvre de ces traitements et outils est en cours, mais, on peut déjà indiquer qu'il sera difficile, pour le moment, de réussir à faire fonctionner en temps réel le système de correction avec les filtres de correction que l'on est en mesure de calculer. En effet, ces filtres sont très sélectifs (passage de la bande passante à la bande atténuée en 5 Hz avec une atténuation supérieure à 80 dB) et à phase nulle, ce qui se traduit par des réponses impulsionnelles de durée légèrement supérieure à la seconde.

La solution de démonstration implémentée sous Pure Data nécessitera vraisemblablement la réalisation d'un compromis sévère sur la longueur des filtres et donc leur sélectivité. On sera pour autant en mesure de donner à entendre le résultat "idéal" du traitement grâce à la re-synthèse IDS et au pré-calcul des sous-bandes pour des extraits musicaux pré-enregistrés.

Il y aura donc deux questions, incontournables, à traiter très rapidement :

- la question de l'implémentation temps réel d'un convolveur en mesure de fonctionner avec des filtres de correction de qualité optimale ;
- la question de la sélectivité minimale des filtres nécessaire pour assurer une correction de qualité pour les trompettistes.

Après avoir étudié la question de la re-synthèse d'un son de trompette ouverte, j'ai évoqué la re-synthèse d'un son de trompette du point de vue du trompettiste et non du spectateur, et ce à l'aide d'une campagne de mesures binaurales qui m'ont donné accès à des données sur ce que le trompettiste entend réellement lorsqu'il joue.

Concernant le traitement à apporter au signal prélevé dans la trompette, la problématique principale reste la convolution en temps réel avec des filtres ayant des réponses impulsionnelles suffisamment longues pour obtenir une correction de qualité suffisante ainsi qu'une externalisation du son fonctionnelle, ce qui durcit vraisemblablement le cahier des charges de conception du convolveur puisqu'il faut être en mesure de mettre en œuvre des filtres réalisant à la fois une correction de qualité et une écoute binaurale satisfaisante pour le trompettiste.

On pourrait ensuite choisir de proposer à l'utilisateur un traitement sur lequel il aurait la main. Il serait alors en mesure d'écouter le son de sa trompette, avec au besoin une écoute binaurale, mais, il pourrait aussi choisir d'adapter les corrections dans les sous-bandes afin d'obtenir un autre son, à son goût. Il serait alors question de détourner le dispositif proposé pour l'utiliser comme un processeur d'effet ne cherchant plus à obtenir un son de trompette naturelle mais un son volontairement modifié, distordu.

Le problème qui se posera alors sera celui de l'ergonomie d'un tel dispositif, son environnement d'implémentation et son interface graphique. En effet, il faudrait réussir à embarquer ce dispositif dans une machine autonome équipée de processeurs capables de traiter le signal en temps réel, idéalement sans faire usage d'un autre ordinateur.

Par ailleurs, pour le réalisme du rendu et les sensations du trompettiste, le développement d'un traitement dynamique semble être approprié. Il pourrait donc être intéressant d'étudier si des algorithmes basés sur l'apprentissage automatique pourraient permettre d'adapter le traitement en temps réel en fonction des intentions du musicien.

Sur un autre plan, ce travail m'a permis de réaliser l'importance des phénomènes de rayonnement du pavillon dans la genèse du son de la trompette. La démarche de modification d'une sourdine existante était en effet contrainte par l'effet qu'une modification du rayonnement peut avoir sur la justesse ou la jouabilité de la trompette. Finalement, n'ayant pas de force de production industrielle, j'aurais pu me concentrer sur la re-synthèse du signal et laisser la question de la fabrication d'un prototype de sourdine aux facteurs de sourdines.

A contrario la démarche de caractérisation des modèles de sourdines apporte au travail une dimension plus universelle et ouvre ce mémoire à des études futures. De plus, le travail de constitution du corpus de données et de son analyse m'a permis de découvrir et de réfléchir sur les pratiques expérimentales et la mise en place des protocoles d'expérimentation, ainsi que sur les outils d'analyse dont le chercheur en acoustique ou en physique ondulatoire dispose pour mener à bien ses travaux.

Bibliographie

- [1] Don Michael Randel, *The new Harvard Dictionary of Music*, Press of Harvard University, 1986.
- [2] Antonio Vivaldi, *Concerto pour deux trompettes en Do majeur*, volume KV 537, XVIIIème siècle.
- [3] Scarlatti, *Sinfonie di Concerto grosso n2 pour trompette et flûte en Ré majeur*, volume IAS 68, 1715.
- [4] Jean-Sébastien Bach, *Wo soll ich fliehen hin*, volume BWV5, 1715.
- [5] Jean-Sébastien Bach, *O Ewigkeit, du Donnerwort*, volume BWV20, 1724.
- [6] Jean-Sébastien Bach, *Schauet doch und sehet, ob irgend ein Schmerz sei*, volume BWV46, 1723.
- [7] Jean-Sébastien Bach, *Du sollt Gott, deinen Herren, lieben*, volume BWV77, 1723.
- [8] H. M. Lewis, Jr., The problem of the tromba da tirarsi in the work of J. S. Bach, *LSU Historical Dissertations and Thesis*, 1975.
- [9] Haydn, *Concerto pour trompette en Mi bémol majeur*, volume HOB.VII/1, 1796.
- [10] Reine Dahlqvist, The keyed trumpet and its greatest virtuoso, Anton Weidinger, *The Brass Press*, 1975.
- [11] J. Ericson, The valve horn and its performing techniques in the nineteenth century : an overview, *The Horn Call Annual*, 4 :2–32, 1992.
- [12] R. Caussé and B. Sluchin, Les sourdines des instruments à vent, *La Maison des Sciences de l'Homme*, 1991.
- [13] Monteverdi, *Orfeo*, volume SV318, 1607.
- [14] Henri Mersenne, *Harmonie universelle, contenant la théorie et la pratique de la musique*, Paris, 1636.
- [15] Ludwig Van Beethoven, *Rondino en mi bémol majeur pour huit instruments à vents*, volume WoO25, 1793.
- [16] W. Osthoff, Trombe sordine, *Archiv für Musikwissenschaft*, XIII :75–95, 1975.
- [17] Jordi Vernier and Damien Gasteau, Étude acoustique de sourdines de trompette, *Université du Maine*, 2011.

- [18] A. Hirschberg, J. Gilbert, R. Msallam, and A. P. J. Wijnands, Shock waves in trombone, *JASA*, 1995.
- [19] E. Leipp, L'intégrateur de densité spectrale ids et ses applications, *Bulletin du Groupe d'Acoustique Musicale*, No. 94, 1977.
- [20] L. Millot, Some clues to build a sound analysis relevant to hearing, *116th Convention of the Audio Engineering Society*, 2004.
- [21] L. Millot and G. Pelé, An objective and subjective alternative audio sounds and scenes analysis : the IDS Analysis, *ISMA*, 2007.
- [22] L. Millot, *Traitement du signal audiovisuel - Applications avec Pure Data*, Collection Audio-Photo-Vidéo. Dunod / ENS Louis Lumière, 2007.
- [23] Michael Gisoni, *Bach for the Trumpet or Cornet*, McGinnis & Marx Music Publishers, New York, 1956.
- [24] D. Gordon and R. Stitzel, *Cheesecake*, Second Floor Music, 2008.
- [25] D. Mercier, *Le Livre Des Techniques Du Son Tome 2*, Éditions Fréquences, 1988.
- [26] F. Otondo, J. H. Rindel, R. Caussé, N. Misdaaris, and P. de la Cuadra, *Directivity of musical instruments in a real performance situation*, ISMA, Mexico City, 2002.
- [27] J. Kipp, *Acoustical Impedances : Calculations and Measurements on a Trumpet*, PhD thesis, RWTH Aachen University, Aachen, 2015.
- [28] A. Chaigne and J. Kergomard, *Acoustique des instruments de musique*, Belin, 2008.
- [29] L. Millot, Proposition de correction du formalisme des paquets d'ondes et premières conséquences induites en acoustique, *ResearchGate* (https://www.researchgate.net/profile/Laurent_Millot), 2015.
- [30] B. Berkopec, *The Physics Of The Trumpet*, PhD thesis, University of Ljubljana, Ljubljana, 2013.

Annexe A

Ondes stationnaires dans un cylindre à une extrémité fermée

On se focalise sur les variations de la pression dans un cylindre creux de longueur L de diamètre d , fermé à une extrémité. On suppose que ce cylindre est le siège de phénomènes ondulatoires sans écoulement fluide. Et, on s'intéresse uniquement aux variations de la pression acoustique.

Si on crée une onde progressive à l'extrémité ouverte grâce à une surpression, cette surpression va progresser dans le cylindre en créant derrière elle une dépression.

On suppose, qu'arrivée au bout fermé du cylindre, cette paire surpression/dépression est réfléchiée et que l'onde repart dans l'autre sens.

Si l'on crée plusieurs ondes progressives simultanées dans le cylindre ces dernières se rencontrent et interfèrent. Les interférences alternativement constructives et destructives créent des nœuds et des ventres de pression dans le cylindre, et l'onde résultante est alors appelée onde stationnaire.

La position des nœuds et des ventres est liée aux conditions aux extrémités du cylindre, or, ici, on considère ici un cylindre fermé à une extrémité. Cette extrémité correspond donc toujours à un nœud de pression.

En satisfaisant cette contrainte, l'onde stationnaire peut adopter plusieurs régimes, ou modes.

Le premier mode, ou mode fondamental est celui pour lequel la fréquence de l'onde est la plus faible et par conséquent sa longueur d'onde la plus grande. C'est le cas où le premier ventre se situe à l'extrémité ouverte du cylindre (on rappelle

que l'extrémité fermée constitue nécessairement un nœud de pression) (cf. Figure 52).

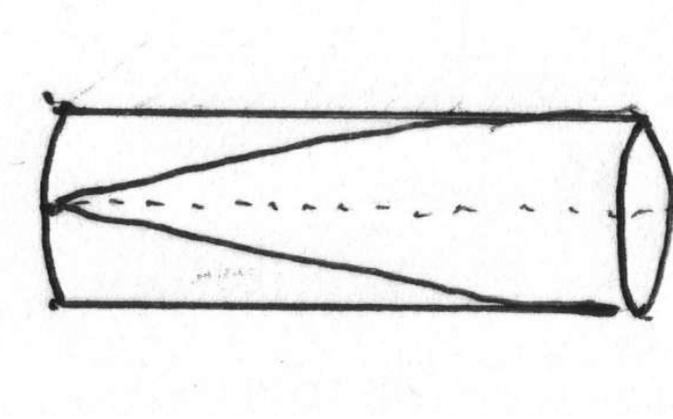


FIGURE 52 – Représentation du premier mode vibratoire de l'onde stationnaire dans un cylindre fermé à une extrémité.

On constate qu'il faut deux aller-retours pour obtenir une période complète pour ce premier mode vibratoire, d'où l'appellation de résonateur "quart d'onde", ce qui se traduit mathématiquement par :

$$L = \frac{\lambda_1}{4}. \quad (6)$$

Or, on a aussi $c_0 = \lambda_1 \cdot f_1$, d'où $f_1 = c_0 / \lambda_1$, ce qui donne pour la fréquence du premier mode de pression, ou fréquence fondamentale :

$$f_1 = \frac{c_0}{4L}. \quad (7)$$

Le mode suivant est celui pour lequel un deuxième ventre de pression apparaît dans le cylindre. Pour ce mode, on a un ventre à l'extrémité ouverte et un ventre dans le cylindre (cf. Figure 53). On constate que l'on a maintenant trois quarts de période spatiale (longueur d'onde) par longueur L de tube au lieu d'un quart de longueur d'onde, donc la fréquence du deuxième mode de pression, f_2 , est donc égale au triple de celle pour le premier mode, donc à $3 \cdot f_1$. On peut remarquer que la fréquence du deuxième mode de pression ne correspond pas au double (octave) de f_1 mais au triple de la fréquence fondamentale, soit $f_2 = 3 \cdot f_1$. On a alors :

$$L = \frac{3}{4} \lambda_2, \quad (8)$$

et finalement, comme annoncé,

$$f_2 = \frac{3c_0}{4L}. \quad (9)$$

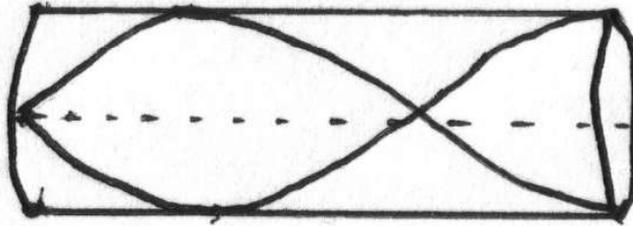


FIGURE 53 – Représentation du troisième mode vibratoire de l’onde stationnaire dans un cylindre fermé à une extrémité.

Pour le premier mode, $n = 1$, on a un seul quart de longueur d’onde dans la longueur L , soit $L = (2 \cdot 1 - 1) \cdot \frac{\lambda_1}{4}$.

Pour le deuxième mode, $n = 2$, on a trois quarts d’onde dans la longueur d’onde, soit $L = (2 \cdot 2 - 1) \cdot \frac{\lambda_2}{4}$.

On constate que la prise en compte d’un nœud de pression supplémentaire s’accompagne de l’apparition de 2 quarts d’ondes supplémentaires. En raisonnant par récurrence, on vérifie que le n -ième mode de pression vérifie :

$$L = (2n - 1) \cdot \frac{\lambda_n}{4}, \quad \forall n \in \mathbb{N}^*,$$

soit encore

$$\lambda_n = \frac{4L}{2n - 1}, \quad \forall n \in \mathbb{N}^*.$$

Et, comme $f_n = c_0/\lambda_n$, on constate finalement que les fréquences susceptibles d’être émises par un tube cylindrique de longueur L , ouvert-fermé, correspondent aux harmoniques impaires de $c_0/4L$:

$$\boxed{f_n = \frac{(2n - 1)c_0}{4L}, \quad \forall n \in \mathbb{N}^*} \quad (10)$$

On constate qu’un cylindre fermé à une extrémité n’est pas en mesure de produire les harmoniques pairs ce qui explique le recours au pavillon pour réussir à produire toutes les harmoniques.

Annexe B

Modélisation physique de la trompette et outils associés

Dans cette annexe, on se place dans l'hypothèse de phénomènes "unidimensionnels" donc ne dépendant que d'une variable d'espace r et d'une variable temporelle t , ce qui signifie que l'on va notamment considérer pour la distance r et à l'instant t , la pression $p(r, t)$ et le débit volumique $u(r, t)$.

La variable r correspond à la distance algébrique par rapport au point pris comme référence dans le modèle de trompette, par exemple l'entrée de l'embouchure.

Dans la suite, on est amené à adopter une description fréquentielle, en fait spatio-fréquentielle, associée au travail avec les transformées de Fourier temporelles de nos signaux ou grandeurs unidimensionnelles. Aussi, on adopte la définition suivante pour la transformée de Fourier temporelle,

$$S[r, \omega] = \text{TF}_\omega [s(r, t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} s(r, t) \cdot e^{-j\omega t} dt, \quad (11)$$

pour le signal spatio-temporel unidimensionnel $s(r, t)$, définition qui fait intervenir la pulsation temporelle ω plutôt que la fréquence f , grandeurs reliées simplement par la relation $\omega = 2\pi f$.

B.1 Précisions sur les notions d'impédances acoustiques

On va voir que l'on utilise en Acoustique, la notion d'impédance acoustique caractéristique qui résulte du lien existant, ici dans les cas des ondes planes, entre les transformées de Fourier temporelle des ondes de pression acoustique aller $p^+(r, t)$ (resp. retour $p^-(r, t)$) et les ondes de débit volumique acoustique aller $u^+(r, t)$ (resp. retour $u^-(r, t)$).

Mais, comme on suppose les phénomènes acoustiques correspondent à la superposition des ondes aller et retour, on utilise aussi une impédance acoustique, locale, qui fait le lien entre les transformées de Fourier temporelles de la pression acoustique locale $p(r, t)$ et du débit volumique acoustique local $u(r, t)$.

Dans cette première section, nous allons introduire ces deux notions et définir leur expression dans le cas des signaux unidimensionnels plans.

B.1.1 Impédance et admittance caractéristiques

On suppose que des ondes acoustiques planes aller et retour, de pression acoustique comme de débit volumique se propagent dans la trompette entre l'embouchure et la fin du pavillon. Et, si on note respectivement $p^+(r, t) = f_1(t - \frac{r}{c_0})$ et $p^-(r, t) = g_1(t + \frac{r}{c_0})$, avec f_1 et g_1 des fonctions potentiellement quelconques à partir du moment où elles sont de classe \mathcal{C}^2 pour la gamme des valeurs $t \pm \frac{r}{c_0}$ utilisées, la pression acoustique totale au point (r, t) est supposée s'écrire :

$$p(r, t) = p^+(r, t) + p^-(r, t). \quad (12)$$

On a une description ondulatoire analogue pour le débit volumique, faisant intervenir des ondes de débits volumiques aller et retour $u^+(r, t)$ et $u^-(r, t)$:

$$u(r, t) = u^+(r, t) + u^-(r, t),$$

avec $u^+(r, t) = f_2(t - \frac{r}{c_0})$ et $u^-(r, t) = g_2(t + \frac{r}{c_0})$ où f_2 et g_2 sont, comme f_1 et g_1 , de classe \mathcal{C}^2 pour la gamme des valeurs $t \pm \frac{r}{c_0}$ utilisées.

Mais, ces ondes de débits volumiques aller et retour sont liées aux ondes de pression acoustique aller et retour grâce à l'équation d'Euler linéarisée qui s'écrit, dans sa forme unidimensionnelle, en considérant que le débit volumique est égal au produit de la section locale $S(r)$ et de la vitesse locale $v(r, t)$ ($u(r, t) = S(r).v(r, t)$) :

$$\rho_0 \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{u(r, t)}{S(r)} \right] = - \frac{\partial p(r, t)}{\partial r},$$

qui devient pour les expressions des ondes aller et retour de pression et de débit acoustiques :

$$\frac{\rho_0}{S(r)} \cdot \left(f_2'(t - \frac{r}{c_0}) + g_2'(t + \frac{r}{c_0}) \right) = -\frac{1}{c_0} \cdot \left(-f_1'(t - \frac{r}{c_0}) + g_1'(t + \frac{r}{c_0}) \right),$$

ce qui s'écrit encore

$$\frac{\rho_0 c_0}{S(r)} \cdot \left(f_2'(t - \frac{r}{c_0}) + g_2'(t + \frac{r}{c_0}) \right) = f_1'(t - \frac{r}{c_0}) - g_1'(t + \frac{r}{c_0}). \quad (13)$$

Si on introduit $Z_0 = \rho_0 c_0$, que l'on nomme classiquement l'impédance acoustique caractéristique spécifique, et, $Z_c(r) = Z_0/S(r)$ que l'on nomme classiquement l'impédance acoustique caractéristique locale¹, on peut réécrire l'équation (13) sous la forme :

$$Z_c(r) \cdot \left(f_2'(t - \frac{r}{c_0}) + g_2'(t + \frac{r}{c_0}) \right) = f_1'(t - \frac{r}{c_0}) - g_1'(t + \frac{r}{c_0}),$$

qui nous conduit naturellement, si on introduit $Y_c(r) = 1/Z_c(r)$ et grâce à l'identification des fonctions respectivement des variables $t - \frac{r}{c_0}$ et $t + \frac{r}{c_0}$, à écrire que :

$$f_2'(t - \frac{r}{c_0}) = Y_c(r) \cdot f_1'(t - \frac{r}{c_0})$$

et

$$g_2'(t + \frac{r}{c_0}) = -Y_c(r) \cdot g_1'(t + \frac{r}{c_0}),$$

ce qui signifie qu'à une constante près, qui sera choisie nulle vu que l'on travaille sur des grandeurs acoustiques, on a :

$$f_2(t - \frac{r}{c_0}) = Y_c(r) \cdot f_1(t - \frac{r}{c_0})$$

et

$$g_2(t + \frac{r}{c_0}) = -Y_c(r) \cdot g_1(t + \frac{r}{c_0}).$$

En repartant des définitions des expressions de nos ondes aller et retour de pression ou de débit acoustiques, on peut finalement écrire que :

$$\begin{cases} u^+(r, t) = Y_c(r) \cdot p^+(r, t) \\ u^-(r, t) = -Y_c(r) \cdot p^-(r, t). \end{cases} \quad (14)$$

1. car variable si la section $S(r)$ varie quand r varie

En utilisant les résultats du système d'équations (14), on peut donc réécrire les pressions et débits volumiques acoustiques uniquement en fonction des ondes aller et retour de pression :

$$\begin{cases} p(r, t) = p^+(r, t) + p^-(r, t) \\ u(r, t) = Y_c(r) \cdot (p^+(r, t) - p^-(r, t)), \end{cases} \quad (15)$$

système qui fait intervenir l'admittance acoustique caractéristique locale $Y_c(r)$.

B.1.2 Impédance acoustique locale

A partir de la pression acoustique $p(r, t)$ et du débit volumique acoustique $u(r, t)$, on peut définir l'impédance acoustique locale comme le rapport des transformées de Fourier temporelles de la pression acoustique totale et du débit volumique total [27], impédance acoustique locale que l'on note $Z(r, \omega)$:

$$Z(r, \omega) = \frac{P(r, \omega)}{U(r, \omega)}. \quad (16)$$

Pour préciser, à partir de la description ondulatoire, l'expression de l'impédance locale $Z(r, \omega)$, il faut appliquer la transformée de Fourier temporelle au système (15) [28] (p. 165-167, chapitre 4, section 5), ce qui va faire intervenir les transformées de Fourier temporelles de $p^+(r, t)$ et de $p^-(r, t)$. On va donc calculer au préalable $P^+(r, \omega)$, en déduire $P^-(r, \omega)$, puis chercher ce que donne la transformée de Fourier temporelle du système (15).

D'après les définitions, on peut successivement écrire :

$$\begin{aligned} P^+(r, \omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} p^+(r, t) \cdot e^{-j\omega t} dt \\ P^+(r, \omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f\left(t - \frac{r}{c_0}\right) \cdot e^{-j\omega t} dt, \end{aligned}$$

qui, si on effectue le changement de variable $\tau = t - \frac{r}{c_0}$, devient :

$$\begin{aligned} P^+(r, \omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \cdot e^{-j\omega\left(\tau + \frac{r}{c_0}\right)} d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} \cdot e^{-j\frac{\omega r}{c_0}} d\tau \\ P^+(r, \omega) &= e^{-j\frac{\omega r}{c_0}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau. \end{aligned}$$

Si on note $P^+(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau).e^{-j\omega\tau} d\tau$, c'est-à-dire que l'on note $P^+(\omega)$ la transformée de Fourier temporelle de la fonction f , on constate que l'on a au final :

$$P^+(r, \omega) = e^{-j\frac{\omega r}{c_0}}.P^+(\omega). \quad (17)$$

En suivant un processus analogue pour $p^-(r, t)$, en utilisant le changement de variable $\tau = t + \frac{r}{c_0}$, ce qui se traduit finalement par le remplacement de c_0 par $-c_0$ dans l'équation (17), on obtient l'expression de $P^-(r, \omega)$ en notant $P^-(\omega)$ la transformée de Fourier temporelle de la fonction g :

$$P^-(r, \omega) = e^{j\frac{\omega r}{c_0}}.P^-(\omega). \quad (18)$$

En utilisant (17) et (18), on peut déterminer la transformée de Fourier temporelle de système (15) :

$$\begin{cases} P(r, \omega) = e^{-j\frac{\omega r}{c_0}}.P^+(\omega) + e^{j\frac{\omega r}{c_0}}.P^-(\omega) \\ U(r, \omega) = Y_c(r).e^{-j\frac{\omega r}{c_0}}.P^+(\omega) - Y_c(r).e^{j\frac{\omega r}{c_0}}.P^-(\omega), \end{cases}$$

qui peut encore s'écrire sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} P(r, \omega) \\ U(r, \omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-j\frac{\omega r}{c_0}} & e^{j\frac{\omega r}{c_0}} \\ Y_c(r).e^{-j\frac{\omega r}{c_0}} & -Y_c(r).e^{j\frac{\omega r}{c_0}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P^+(\omega) \\ P^-(\omega) \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Classiquement ([27, 28] entre autres), on introduit aussi la variable k définie par $k = \omega/c_0$ qui est analogue à un nombre d'onde.

Mais, d'après Millot [29], on ne peut pas considérer que c'est effectivement le nombre d'onde k associé à la pulsation temporelle ω grâce à la relation de dispersion $\omega = k.c_0$ car c'est une relation qui valable dans le plan (k, ω) mais pas dans le plan (r, ω) . Pour considérer k comme le nombre d'onde associé à la pulsation temporelle ω , il faudrait partir part non pas d'une représentation spatio-fréquentielle à partir de la seule transformée de Fourier temporelle, mais, d'une représentation bi-fréquentielle correspondant à une bi-transformée de Fourier spatio-temporelle, et ce, à condition de prendre en compte une contrainte supplémentaire, l'hypothèse selon laquelle les signaux sont des ondes planes. Ce n'est que l'union de l'utilisation de la bi-transformée de Fourier spatio-temporelle avec l'hypothèse ondulatoire qui conduit respectivement aux relations de dispersion $\omega = k.c_0$ et $\omega = -k.c_0$, valides uniquement dans le plan (k, ω) , selon que l'on considère les ondes aller ou retour, relations qui établissent le lien entre ω et k selon la nature aller ou retour des ondes considérées.

Nous utiliserons donc $k = \omega/c_0$, mais, sans supposer qu'il s'agit du nombre d'onde associé à la pulsation temporelle ω , juste parce que cela permet d'alléger un peu les expressions.

A partir du système d'équations (19), on peut calculer l'expression du rapport de $P(r, \omega)$ et $U(r, \omega)$, donc l'expression de l'impédance acoustique locale $Z(r, \omega)$:

$$Z(r, \omega) = \frac{e^{-jkr} \cdot P^+(\omega) + e^{jkr} \cdot P^-(\omega)}{Y_c(r) \cdot e^{-jkr} \cdot P^+(\omega) - Y_c(r) \cdot e^{jkr} \cdot P^-(\omega)}, \quad (20)$$

qui nécessite encore la détermination des deux grandeurs $P^+(\omega)$ et $P^-(\omega)$.

En introduisant le coefficient de réflexion défini par :

$$R(r, \omega) = \frac{e^{jkr} \cdot P^-(\omega)}{e^{-jkr} \cdot P^+(\omega)} = \frac{P^-(\omega)}{P^+(\omega)} \cdot e^{2jkr},$$

l'expression de l'impédance acoustique locale $Z(r, \omega)$ s'écrit encore :

$$Z(r, \omega) = Z_c(r) \cdot \frac{1 + R(r, \omega)}{1 - R(r, \omega)}, \quad (21)$$

qui ne nécessite plus que la connaissance du coefficient de réflexion pour déterminer complètement $Z(r, \omega)$.

En inversant le relation (21), on obtient l'expression du coefficient de réflexion $R(r, \omega)$ en fonction de l'impédance acoustique locale $Z(r, \omega)$:

$$R(r, \omega) = \frac{Z(r, \omega) - Z_c(r)}{Z(r, \omega) + Z_c(r)}.$$

Comme le coefficient de réflexion $R(r, \omega)$ ne fait intervenir qu'un unique aller/retour dans le tuyau contrairement à l'impédance acoustique locale $Z(r, \omega)$ qui prend en compte tous les aller/retours qui ne sont pas suffisamment atténués par les pertes², la transformée de Fourier temporelle inverse du coefficient de réflexion $R(r, \omega)$ sera beaucoup plus courte que celle de l'impédance acoustique locale $Z(r, \omega)$. Il sera donc plus intéressant, pour limiter les calculs dans le cas d'un travail de re-synthèse en temporel, de partir de l'équation :

$$P(r, \omega) = Z_c(r) \cdot \frac{1 + R(r, \omega)}{1 - R(r, \omega)} \cdot U(r, \omega),$$

2. Attention, pour l'instant on n'a pas pris en compte les phénomènes de dissipation. Il suffit de savoir que cela va modifier les expressions de $R(r, \omega)$, $Z_c(r)$ et donc $Z(r, \omega)$ en changeant notamment les quantités réelles k et $Z_c(r)$ en des quantités à valeurs complexes.

qui s'écrit encore :

$$P(r, \omega) \cdot (1 - R(r, \omega)) = Z_c(r) \cdot (1 + R(r, \omega)) \cdot U(r, \omega),$$

soit encore :

$$P(r, \omega) = Z_c(r) \cdot U(r, \omega) + R(r, \omega) \cdot (P(r, \omega) + Z_c(r) \cdot U(r, \omega))$$

dont la transformée de Fourier temporelle inverse s'écrit³ si on considère la transformée de Fourier temporelle inverse $g(r, t) = \text{TF}_\omega^{-1} [R(r, \omega)]$:

$$p(r, t) = Z_c(r) \cdot u(r, t) + g(r, t) * (p(r, t) + Z_c(r) \cdot u(r, t)). \quad (22)$$

Si la présence du terme $g(r, t) * p(r, t)$ semble représenter un problème pour la résolution, il n'en est rien en pratique car il suffit d'opter pour une approximation numérique de l'intégrale associée à la convolution par la somme des aires des triangles à gauche pour faire disparaître la contribution de $p(r, t)$ et disposer ainsi d'un terme ne faisant intervenir que les valeurs pour les instants antérieurs à t de $p(r, t)$.

Et, comme la longueur de $g(r, t)$ est très courte vu qu'il s'agit de la description des phénomènes de réflexion sur un unique aller-retour, la version numérique de (22) permet de réaliser des synthèses avec des temps de calculs réduits de manière drastique par rapport aux temps de calculs obtenus en utilisant la transformée de Fourier temporelle inverse de l'admittance ramenée.

3. dans le cas sans perte car sinon, il faut vérifier ce qui se passe en détail pour l'expression de $Z_c(r)$

B.2 Description spatio-fréquentielle et matrice de transmission

B.2.1 Principes

En fait, classiquement, on utilise deux occurrences du système d'équations (19) : une occurrence pour le point spatio-fréquentiel (r_1, ω) et une autre pour le deuxième point spatio-fréquentiel (r_2, ω) où r_1 et r_2 correspondent à l'entrée et la sortie d'un élément cylindrique (pas forcément de section circulaire) dont la section reste invariante pour que $Z_c(r)$ ou $Y_c(r)$ restent constantes sur l'intervalle $[r_1, r_2]$. Puis, on élimine entre les deux descriptions matricielles les quantités $P^+(\omega)$ et $P^-(\omega)$.

Tous calculs faits, on obtient le lien entre l'entrée et la sortie de l'élément cylindrique en introduisant la définition de la longueur du tube $L = r_2 - r_1$:

$$\begin{pmatrix} P(r_1, \omega) \\ U(r_1, \omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(kL) & jZ_c(r_1) \cdot \sin(kL) \\ jY_c(r_1) \cdot \sin(kL) & \cos(kL) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P(r_2, \omega) \\ U(r_2, \omega) \end{pmatrix}, \quad (23)$$

qui fait apparaître la matrice de transmission pour un élément de tube cylindrique de longueur L commençant en $r = r_1$, matrice que l'on note dans la suite $M(r_1, \omega)$.

La description matricielle (23) correspond à l'hypothèse de propagation acoustique sans pertes. Et, si on prend en compte les pertes, la matrice de transmission change pour devenir :

$$M(r_1, \omega) = \begin{pmatrix} \cosh(\Gamma L) & \zeta_c(r_1) \cdot \sinh(\Gamma L) \\ \Upsilon_c(r_1) \cdot \sinh(\Gamma L) & \cosh(\Gamma L) \end{pmatrix}, \quad (24)$$

où $\zeta_c(r_1)$, $\Upsilon_c(r_1)$ et Γ correspondent à des versions à valeurs complexes de $Z_c(r_1)$, $Y_c(r_1)$ et k .

B.2.2 Modélisation spatio-fréquentielle des éléments de la trompette

La matrice de transmission correspond au cas d'un tube de section constante sur toute sa longueur, donc on peut commencer par envisager de modéliser la perce de la trompette par une unique matrice de transmission où L serait pris égal à L_{per} , la longueur de la perce.

Une modélisation un peu plus raffinée consiste à prendre en compte les variations de section de la perce et modéliser celle-ci comme une succession de tubes cylindriques de longueur élémentaire et de section variant progressivement d'un tube à l'autre pour suivre, aussi facilement que le permet le choix de la longueur élémentaire, l'évolution du profil de la perce.

Dans ce cas, si on dit que r_{per} correspond à l'entrée de la perce et r_{pav} au début du pavillon, que $L_e = L/N_{\text{per}}$ est la longueur des N_{per} tubes élémentaires, on a une représentation matricielle équivalente qui correspondrait au produit matriciel d'un nombre N_{per} de matrices de transmission $M(r_1 + k.L_e, \omega)$:

$$\begin{pmatrix} P(r_{\text{per}}, \omega) \\ U(r_{\text{per}}, \omega) \end{pmatrix} = \prod_{k=1}^{N_{\text{per}}} M(r_1 + k.L_e, \omega) \cdot \begin{pmatrix} P(r_{\text{pav}}, \omega) \\ U(r_{\text{pav}}, \omega) \end{pmatrix}.$$

On peut aussi modéliser l'embouchure ainsi que le pavillon par un produit de matrices de transmissions élémentaires.

Ainsi, si on considère que la trompette est effectivement constituée d'une embouchure modélisée par une matrice de transmission équivalente $M_{\text{emb}}(\omega)$, suivie d'une matrice de transmission équivalente $M_{\text{per}}(\omega)$ modélisant la perce et enfin une matrice de transmission équivalente $M_{\text{pav}}(\omega)$ pour le pavillon, la modélisation de la trompette correspond alors à une matrice de transmission équivalente $M_{\text{tromp}}(\omega)$ définie par :

$$M_{\text{tromp}}(\omega) = M_{\text{emb}}(\omega) \cdot M_{\text{per}}(\omega) \cdot M_{\text{pav}}(\omega),$$

dont on notera les coefficients de la manière suivante :

$$M_{\text{tromp}}(\omega) = \begin{pmatrix} M_{\text{tromp},11}(\omega) & M_{\text{tromp},12}(\omega) \\ M_{\text{tromp},21}(\omega) & M_{\text{tromp},22}(\omega) \end{pmatrix}.$$

La matrice de transmission équivalente pour la trompette $M_{\text{tromp}}(\omega)$ permet de faire le lien entre les grandeurs en entrée, donc au début de l'embouchure, que nous supposons associées à l'indice in, et les grandeurs en sortie, donc à la fin du pavillon, que nous supposons associées à l'indice out. On a donc :

$$\begin{pmatrix} P(r_{\text{in}}, \omega) \\ U(r_{\text{in}}, \omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{\text{tromp},11}(\omega) & M_{\text{tromp},12}(\omega) \\ M_{\text{tromp},21}(\omega) & M_{\text{tromp},22}(\omega) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P(r_{\text{out}}, \omega) \\ U(r_{\text{out}}, \omega) \end{pmatrix}. \quad (25)$$

Si on note l'impédance acoustique, que l'on appelle aussi impédance ramenée en entrée, $Z(r_{\text{in}}, \omega) = P(r_{\text{in}}, \omega)/U(r_{\text{in}}, \omega)$ et $Z(r_{\text{out}}, \omega) = P(r_{\text{out}}, \omega)/U(r_{\text{out}}, \omega)$, l'impédance terminale en sortie, on peut calculer l'impédance ramenée en entrée en fonction de l'impédance terminale grâce à l'équation (25) :

$$Z(r_{\text{in}}, \omega) = \frac{M_{\text{tromp},11}(\omega) \cdot Z(r_{\text{out}}, \omega) + M_{\text{tromp},12}(\omega)}{M_{\text{tromp},21}(\omega) \cdot Z(r_{\text{out}}, \omega) + M_{\text{tromp},22}(\omega)}. \quad (26)$$

Expression dans laquelle il reste à définir l'impédance terminale, qui correspondrait ici à l'impédance de rayonnement, ainsi que les coefficients de la matrice de transmission équivalente pour la trompette, donc les matrices de transmission équivalentes pour l'embouchure, la perce et le pavillon ainsi que leur produit matriciel.

Par exemple, dans [27], Kipp propose l'expression suivante pour l'impédance équivalente d'entrée du pavillon exponentiel :

$$Z(r_{\text{pav}}, \omega) = \frac{Z_c(0)e^{-j\lambda L}((\lambda - jm)Z_L - Z_c(L)) + (\lambda + jm)Z_L + Z_c(L)}{(k^2 Z_L - Z_c(L)(\lambda + jm))e^{-j\lambda L} - (k^2 Z_L - Z_c(L)(\lambda - jm))e^{j\lambda L}} \quad (27)$$

où Z_L correspond à l'impédance ramenée en $r = L^4$ et m au coefficient apparaissant dans la fonction décrivant le pavillon :

$$r(x) = r_0 e^{mx} \quad (28)$$

avec r le rayon du pavillon et r_0 le rayon à l'entrée du pavillon.

Par ailleurs, Berkopec montre [30] que, pour avoir une réflexion minimale, l'impédance doit décroître de façon exponentielle. Or on voit dans l'expression (27) que quand L augmente, $Z(r_{\text{pav}}, \omega)$ décroît effectivement de façon exponentielle vu que nous nous plaçons dans un cas avec pertes donc avec un λ à valeurs complexes mais tel que :

$$\text{Re}(\lambda) > 0,$$

condition nécessaire pour que $e^{-j\lambda L}$ fasse intervenir à un amortissement exponentiel.

Si on dispose de la modélisation pour la trompette, du début de l'embouchure à la sortie du pavillon, il manque la description du trompettiste, qui fait l'objet de la section suivante, pour compléter la modélisation.

4. donc à l'impédance locale en bout du pavillon

B.3 Modèle physique des lèvres

Le trompettiste en soufflant dans la trompette génère un flux d'air qui est modulé par ses lèvres. Ces dernières, en s'ouvrant et se fermant alternativement à une très grande vitesse modulent le flux et créent une succession de surpressions et de dépressions.

En ajustant la tension dans ses lèvres et la forme de son masque, le trompettiste force ses lèvres à vibrer à une fréquence choisie qui, quand les lèvres sont couplées à la trompette, correspond à un pic de la courbe du module de l'impédance d'entrée de la trompette.

La nature du mouvement des lèvres et des phénomènes qu'il engendre est la partie de la trompette la plus complexe à modéliser. Bien souvent on réduit la description des lèvres à un modèle masse-ressort en mouvement sur une seule dimension (cf. Figure 54) alors qu'en réalité les lèvres bougent suivant les trois dimensions spatiales [30].

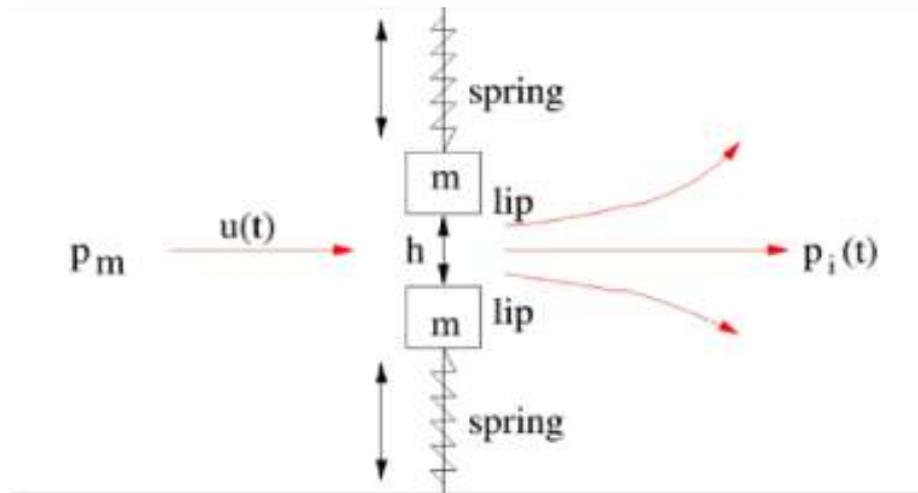


FIGURE 54 – Modèle physique simplifié des lèvres : deux systèmes masse-ressort l'un en face de l'autre. À gauche le conduit vocal du trompettiste, à droite l'embouchure. D'après B. Berkopec [30].

On a donc un système d'équations différentielles mécaniques pour décrire le mouvement des deux oscillateurs amortis censés représenter les lèvres.

Il faut en plus déterminer une loi, non linéaire, définissant la section d'ouverture existant entre les deux lèvres en fonction d'un paramètre associé à l'ouverture entre les lèvres qui va permettre de calculer le débit volumique s'écoulant au travers des lèvres, débit qui est supposé égal au débit volumique juste en amont des lèvres, ce qui conduit à écrire une équation de conservation du débit volumique.

Pour compléter la modélisation des lèvres, il reste encore à considérer une équation permettant de faire le lien entre la différence de pression entre l'amont et l'aval des lèvres Δp_{lev} et l'air s'échappant par les lèvres. On suppose que l'on a un écoulement de type jet libre quasi stationnaire, se dissipant par turbulences, associé à la différence de pression amont/aval au niveau des lèvres Δp_{lev} . Cette hypothèse conduit à considérer une relation de Bernoulli faisant intervenir la différence de pression amont/aval et le terme de densité d'énergie cinétique associé à la vitesse v_{jet} dans le jet libre, soit une relation du type :

$$\Delta p_{lev} = \frac{1}{2} \rho_0 v_{jet}^2.$$

Il reste alors à compléter la modélisation par la description de la source. Une première solution simple, consiste à supposer que l'on a une source de pression située juste en amont des lèvres. Sinon, on peut aussi prendre en compte un conduit vocal simplifié, en réutilisant éventuellement le principe des matrices de transmission, avec une source de pression ou de débit volumique selon la configuration retenue pour le conduit vocal.

Ensuite, il faut numériser l'ensemble des équations et mettre en œuvre la résolution du problème soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel⁵.

Et, si on veut résoudre ce problème en temporel, en minimisant les temps de calcul, on préférera utiliser la description de la trompette non pas à partir de l'impédance ramenée au niveau des lèvres mais à partir de la fonction de réflexion au même niveau et donc considérer une équation temporelle, pour la trompette complète, du type de (22).

Il reste à choisir un paramètre pertinent⁶ et, à partir du système des équations numérisées, utilisant un facteur de sur-échantillonnage temporel suffisant, déterminer l'algorithme de résolution non linéaire adapté permettant de calculer, échantillon par échantillon, toutes les grandeurs spatio-temporelles utiles.

5. mais plutôt dans le cas d'une excitation simple du type source d'intensité constante ?

6. par exemple la différence de pression amont/aval au niveau des lèvres voire le débit volumique à cet endroit

Table des figures

1	Défense d'éléphant taillée, utilisée pour le signalement.	3
2	Trompette naturelle militaire aux couleurs du Royaume-Uni.	4
3	Reproduction actuelle d'une tromba di tirarsi.	5
4	Bugle à clefs, des années 1830.	5
5	Anatomie d'un piston Périnet (Guillaume Piolle / CC BY 3.0).	6
6	Trompette à piston de la fin XIXème siècle.	7
7	Vue en coupe d'une embouchure. Les lèvres se posent sur le haut. Le contact lèvres-embouchure doit être étanche.	8
8	Trompette en Si bémol Yamaha 8335 (Yamaha Corporation).	8
9	Module de l'impédance d'entrée d'une trompette en si bémol et fréquences des pics mesurés, d'après Caussé et Sluchin [12] p.24.	10
10	représentation de la sourdine d'après l'Harmonie Universelle de Mersenne [14].	12
11	Sourdine sèche.	13
12	Sourdine wah-wah.	14
13	Sourdine Solotone.	15
14	Sourdine muette Yamaha PM7x, utilisée dans l'étude. L'intérieur est creux. On voit sur le fond la prise jack reliée au capteur et le petit évent qui permet à l'air de s'échapper. On voit le cylindre de mousse enroulé autour du corps de la sourdine qui freine la propagation des ondes vers le pavillon.	15
15	Sourdine plunger.	16
16	Sourdine Velvet.	16
17	Sourdine bol.	17
18	Vue en coupe de trois types de sourdine : sèche (a), bol (b) et wah-wah (c). D'après Vernier et Gasteau p.5 [17].	18
19	Tracé de la pression dans le tuyau d'un trombone en haut et de la pression rayonnée par le pavillon d'un trombone en bas, à différentes nuances musicales. On observe la formation d'ondes de chocs quand le niveau de pression est élevé. Le comportement de la trompette est analogue à celui du trombone. D'après A. Hirschberg, J. Gilbert, R. Msallam, A.P.J. Wijnands, [18].	24
20	Symbole de notation d'un forzando.	25

21	Impédance d'entrée d'un trombone avec une sourdine sèche. D'après Caussé et Sluchin, [12] p.26.	26
22	Position du bol : en haut, enfoncé ; en bas, ouvert.	28
23	Sourdine bol sans son bol. Le fond est fermé. Il existe également des modèles métalliques.	29
24	Schéma représentant la configuration de prise de son pour les mesures.	30
25	Portrait IDS médian pour la sourdine bol avec le bol enfoncé pour un do4 joué <i>forte</i>	35
26	Portrait IDS médian pour la trompette débouchée pour un do4 joué <i>forte</i>	36
27	Gradient IDS médian du son trompette débouchée <i>vs</i> son de sourdine bol avec bol enfoncé pour un do4 joué <i>forte</i>	37
28	Tracé du gradient présenté dans la Figure 27.	38
29	Tracé des portraits mini, maxi et médian pour la mesure du do4 joué <i>forte</i> avec une trompette bouchée par une sourdine bol avec le bol enfoncé.	39
30	Tracé du gradient du son produit avec une sourdine <i>vs</i> sans sourdine pour une sourdine sèche. En haut : nuance <i>mezzoforte</i> pour un do4 ; en bas : do 5 et avec un son cuivré, nuance <i>forzando</i>	43
31	Tracé du gradient son avec sourdine <i>vs</i> son sans sourdine pour une sourdine wah avec tube. En haut : registre médium et bas niveau ; en bas : registre aigu et bas niveau.	46
32	Gradient son avec sourdine <i>vs</i> son sans sourdine pour une sourdine Wah sans le tube. En haut : do4, donc son registre médium, <i>piano</i> ; en bas : sol3 donc son registre grave en cuivrant le son, nuance <i>forzando</i>	48
33	Tracé du gradient son avec sourdine <i>vs</i> son sans sourdine pour une sourdine bol dont le bol est enfoncé. En haut : do4 donc dans le registre moyen, et niveau moyen, nuance <i>mezzoforte</i> ; en bas : sol3 donc dans le grave ; nuance <i>forte</i>	50
34	Tracé du gradient son avec sourdine <i>vs</i> son sans sourdine pour une sourdine bol dont le bol est enfoncé, pour un sol5 donc registre aigu, nuance <i>mezzoforte</i> . Le premier creux est inexistant, le deuxième est lui très prononcé.	51
35	Tracé du gradient son avec sourdine <i>vs</i> son sans sourdine pour une sourdine bol dont le bol est ressorti. En haut : do4 donc registre médium, niveau moyen ; en bas : sol5 donc registre aigu, niveau moyen (<i>mezzoforte</i>).	53
36	Tracé du gradient son avec sourdine <i>vs</i> son sans sourdine pour une sourdine muette. En haut : do5 donc registre médium/aigu, son cuivré, nuance <i>forzando</i> ; en bas : sol3 donc registre grave, niveau fort.	55
37	Tracé du gradient son avec sourdine <i>vs</i> son sans sourdine pour une sourdine Velvet. En haut : do5, <i>piano</i> ; en bas : do4 <i>forte</i>	57

38	Tracé du gradient son avec sourdine <i>vs</i> son sans sourdine pour une sourdine Velvet et jouant un do5 <i>piano</i>	58
39	Tracé du gradient son avec sourdine <i>vs</i> son sans sourdine pour une sourdine Plunger. En haut : sol4, <i>piano</i> ; en bas : do4 <i>mezzoforte</i> . . .	61
40	Tracé du gradient son avec sourdine <i>vs</i> son sans sourdine pour une sourdine Plunger et jouant un do5 <i>forzando</i>	62
41	Courbes montrant les deux premiers pics de l'impédance d'entrée d'un trombone bouché d'une sourdine sèche dont l'enfoncement, c'est-à-dire en réalité l'épaisseur des lames de liège, varie. La nature et la fréquence des pics varient également. D'après Caussé et Sluchin [12].	64
42	Sourdine Yamaha ouverte dévoilant la cavité intérieure, le tuyau courbé et au milieu, traversant la sourdine de part en part, les conducteurs reliant le capteur à la connectique.	66
43	Tracé du gradient son avec sourdine muette <i>vs</i> son sans sourdine pour l'extrait de musique classique (en haut) et jazz (en bas).	68
44	Tracé du gradient trompette débouchée <i>vs</i> trompette bouchée par la sourdine muette avec la première modification "perce de travées" (en haut) et avec les deux modifications "perce de travées" et "ajout d'absorbant" (en bas), pour l'extrait de musique classique.	69
45	Tracé du gradient trompette débouchée <i>vs</i> trompette bouchée par la sourdine muette avec la première modification "perce de travées" (en haut) et avec les deux modifications "perce de travées" et "ajout d'absorbant" (en bas), pour l'extrait de musique jazz.	70
46	Capteur équipant la sourdine Yamaha PM7x.	74
47	Schéma du préamplificateur.	75
48	Tableaux de valeurs du gradient son débouché <i>vs</i> son prélevé en amont du pavillon quand le trompette est bouchée avec le modèle alternatif de sourdine ayant subi la première modification "percée de travées" et pour l'extrait de musique classique.	76
49	Tracé du gradient son débouché <i>vs</i> son prélevé en amont du pavillon quand le trompette est bouchée avec le modèle alternatif de sourdine ayant subi la première modification "percée de travées". En haut : extrait de musique classique ; en bas : extrait de musique jazz. . . .	78
50	Diagramme de directivité de la trompette dans l'axe horizontal (en haut) et vertical (en bas) pour trois registres différents (grave, médium, aigu) et en moyenne sur toute la tessiture. Le pavillon est dirigé vers le bas pour l'axe horizontal et vers la droite pour l'axe vertical. D'après Otondo, Rindel, Caussé, Misadaaris et De La Cuadra [26].	82
51	Capsule DPA 4060 en configuration de prise de son binaurale. . . .	83
52	Représentation du premier mode vibratoire de l'onde stationnaire dans un cylindre fermé à une extrémité.	93
53	Représentation du troisième mode vibratoire de l'onde stationnaire dans un cylindre fermé à une extrémité.	94

54 Modèle physique simplifié des lèvres : deux systèmes masse-ressort
l'un en face de l'autre. À gauche le conduit vocal du trompettiste, à
droite l'embouchure. D'après B. Berkopec [30]. 105

Liste des tableaux

1	Table présentant les conventions utiliser pour nommer les mesures. .	32
2	Découpage fréquentiel utilisé par les outils d'analyse IDS et lexique correspondant, tel qu'enseigné à Louis Lumière dans les cours concernant le son musical.	40