



HAL
open science

La boîte expressive de l'orgue : étude acoustique de la densité de tuyaux et d'une façade à ouverture variable

Priscila M.M. Dal Moro, Gonzalo Villegas Curulla, Benoît Fabre, C.
d'Alessandro

► To cite this version:

Priscila M.M. Dal Moro, Gonzalo Villegas Curulla, Benoît Fabre, C. d'Alessandro. La boîte expressive de l'orgue : étude acoustique de la densité de tuyaux et d'une façade à ouverture variable. 16ème Congrès Français d'Acoustique (CFA) 2022, Apr 2022, Marseille, France. pp.1-7. hal-03838112

HAL Id: hal-03838112

<https://hal.science/hal-03838112>

Submitted on 3 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



16^{ème} Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

La boîte expressive de l'orgue : étude acoustique de la densité de tuyaux et d'une façade à ouverture variable

P.M.M. Dal Moro^a, G. Villegas Curulla^a, B. Fabre^{a,b}, and C. d'Alessandro^a

^aSorbonne Université, CNRS, Institut d'Alembert, UMR 7109, LAM, Paris, France

^bSorbonne Université, Institut Collegium Musicæ, Paris, France



La boîte expressive est un dispositif qui permet de contrôler l'ouverture d'un buffet d'orgue, et ainsi de moduler l'intensité, le spectre, la directivité du son rayonné. Pour étudier ces effets un buffet d'orgue simplifié a été conçu et des mesures acoustiques en chambre anéchoïque ont été effectuées. Une première question porte sur la perturbation du champ interne de la boîte vide due à l'insertion d'une forêt de tuyaux. Une seconde question porte sur le son rayonné à travers la façade de la boîte, pour trois configurations : 1. façade fermée; 2. façade avec une fente; 3. façade ouverte. En troisième lieu, la directivité du rayonnement à travers une fente en façade a été étudiée. Les résultats montrent que : 1. L'insertion d'une forêt de tuyaux à l'intérieur d'une boîte perturbe la propagation (diminution des amplitudes et des fréquences modales). 2. La transmission du son à travers la façade dépend surtout de sa masse et de l'insertion d'une fente, qui agit comme un filtre passe-haut. 3. Le modèle de fente infiniment longue de Mellow et Kärkkäinen (2011) fournit une approximation raisonnable de la directivité de rayonnement lorsqu'on considère une incidence normale du son derrière la fente. Cependant, un champ acoustique plus complexe dû à la boîte modifie les propriétés de rayonnement.

1 Introduction

Le son produit par un orgue résulte de l'interaction de plusieurs phénomènes acoustiques. Initialement généré par de nombreux tuyaux, le son résonne à l'intérieur du buffet. Ensuite, les corps des tuyaux diffractent le son qui est finalement rayonné à travers la façade de l'instrument. Vers la fin du XVII^e siècle, dans le but de délivrer une sorte d'expression supplémentaire à l'orgue, est née l'idée d'introduire des jalousies mobiles dans la façade de l'instrument, jusque-là toujours ouverte [1, 2]. Aujourd'hui appelée "boîte expressive", ce dispositif permet des effets de *crescendo-decrescendo* lors de l'ouverture-fermeture des jalousies. Subjectivement, lors l'ouverture le son est entendu comme plus intense, brillant et riche; alors que la fermeture évoque une la sensation d'éloignement de la source.

Depuis les années 2000, seulement quelques études autour de l'acoustique de la boîte expressive ont été menées. Braasch [1] a mesuré des instruments contemporains et historiques pour étudier l'efficacité de trois dispositifs d'expression différents, y compris la boîte expressive, dont la plage dynamique s'est avérée être d'environ 10-20 dB. Luizard et d'Alessandro [2] ont effectué des mesures dans un orgue romantique pour explorer l'utilisation de la boîte expressive comme moyen d'expression musicale. Ils ont constaté des différences de niveau sonore plus importantes lors de la fermeture des jalousies sur les anches, ce qu'ils expliquent par le fait que les anches ont un spectre plus riche et que la boîte fermée atténue davantage les hautes fréquences. Les auteurs ont aussi constaté que le taux d'ouverture affecte moins le champ acoustique à l'intérieur de la boîte qu'à l'extérieur. Angster *et al* [3] ont construit un "orgue de recherche", dont parmi les innovations se trouvent des jalousies amovibles nouvellement développées. Celles-ci résultent dans un rayonnement sonore symétrique plus favorable et une amplification relative (d'environ 5 dB) significativement plus élevée.

Ces travaux se focalisent sur le son rayonné, excluant toute analyse du champ interne et du couplage entre les champs interne et externe à la boîte expressive. Désormais, à partir de mesures sur une maquette de buffet d'orgue simplifié en contexte anéchoïque, nous cherchons à savoir de quelle façon le champ interne de la boîte (une cavité parallélépipédique) modifie le son généré par une source

acoustique et comment la présence de tuyaux (diffuseurs cylindriques) change ce champ en termes de réponse modale. Ensuite, nous nous posons la question sur l'effet de l'ouverture de la façade – fermée, ouverte ou ayant une seule jalousie ouverte (une fente verticale) –, sur le contenu spectral et le niveau sonore du son transmis à l'extérieur de la boîte. En dernier lieu, nous nous intéressons au rayonnement à travers une seule jalousie selon différents champs acoustiques incidents.

D'autres aspects de l'analyse de cette même maquette sont développés dans un second article. Cet article-frère [4] s'intéresse surtout au rayonnement à travers un système de fentes multiples. De plus, sont étudiées les influences d'une densité variable des tuyaux à l'intérieur du buffet et d'un nombre variable de parois rigides.

Le présent article est structuré comme suit : le dispositif étudié (un buffet d'orgue simplifié) est décrit dans la Section 2. Une révision des modèles qui permettent d'analyser le système ainsi que la description du protocole expérimental adopté sont introduites dans la Section 3. Les résultats et les discussions qui suivent ces derniers sont présentées dans les Sections 4 et 5. Les contraintes des modèles et du dispositif étudié, comme la reproductibilité des mesures sont discutées au fur et à mesure au long de cet article.

2 Dispositif étudié

La boîte a été fabriquée avec des panneaux de bois latté de 2 cm d'épaisseur, et ses dimensions internes sont : $L_x = 134$ cm, $L_y = 98$ cm, et $L_z = 58$ cm. Ces dimensions ont ainsi été choisies pour 1. éviter la superposition modale en assurant des proportions adéquates entre les dimensions [5], et 2. limiter le poids pour des raisons pratiques. Les quatre parois et le plafond sont amovibles pour faciliter les opérations à l'intérieur de la boîte. Une fenêtre de 25 cm de largeur et 55 cm de hauteur a été découpée dans la paroi frontale. Cette fenêtre a été conçue pour permettre l'insertion d'une fente de 4 cm de largeur et 55 cm de hauteur, découpée dans un panneau en plexiglas de 30 x 60 cm². L'axe vertical de la fenêtre, et donc celui de la fente, a été décalé de 4,5 cm à droite de l'axe vertical au centre de la paroi frontale afin de limiter la coïncidence avec les lignes nodales.

Sachant que l'intérieur d'un orgue abrite de nombreux tuyaux, une forêt de 170 tubes en PVC de 4 cm de diamètre répartis en quinconce a été conçue. Même si dans les orgues les tuyaux n'ont pas tous la même longueur, ni la même distance entre eux, dans la recherche d'une configuration favorisant un comportement 2D, il a été choisi de garder ces dimensions constantes. Ainsi, tous les tuyaux s'étendent du fond jusqu'au toit de la boîte de manière à éviter une dispersion supplémentaire due aux bords de tête. Les tuyaux ont été remplis d'une mousse acoustique pour amortir leur résonance. Enfin, une densité élevée de tuyaux a été choisie dans l'ambition d'assurer que leur effet de diffusion était perceptible – la concentration de diffuseurs est $\phi_{\%} = \pi/8$.

L'ensemble du buffet d'orgue simplifié a été conçu pour favoriser au mieux un comportement 2D, tant pour la propagation à l'intérieur du buffet que pour la fente rayonnante. Bien entendu, la fente marque la frontière entre le comportement interne en 2D et le rayonnement externe dans un espace libre en 3D. Une représentation du dispositif étudié est illustrée dans la Figure 1.

Dans l'intention de garantir une excitation uniforme le long de la fente, une source linéique composée d'un réseau de 18 haut-parleurs AURA (modèle NSW2-326-8A) a été conçue. Les haut-parleurs (qui ont une bande passante entre 200 Hz et 15 kHz) font 5 cm de diamètre ont été confinés dans un boîtier en plexiglas isolé acoustiquement. Les signaux envoyés à la source sont amplifiés avec un amplificateur CARVER PM-175. Les signaux de pression ont été mesurés avec des microphones omnidirectionnels 1/2" Bedrock-audio modèle BAMT1. Enfin, une carte son Babyface Pro connectée à un ordinateur personnel avec MatLab a été utilisée pour générer et enregistrer les signaux.

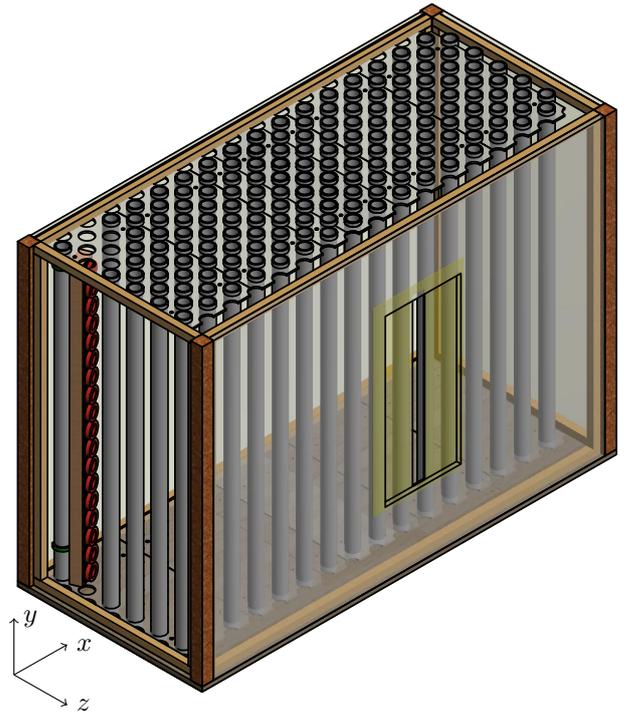


FIGURE 1 – Buffet d'orgue simplifié. Schéma montrant la position de la fenêtre contenant la fente en façade et la disposition de la source et des tuyaux à l'intérieur de la boîte.

3 Analyse du problème et protocole

3.1 État de l'art

Dans cette section, une brève revue de la bibliographie consultée est présentée, l'attention étant tournée spécialement vers les modèles théoriques utilisés.

3.1.1 Réponse modale d'une cavité parallélépipédique

Traditionnellement, l'estimation des fréquences modales d'une cavité parallélépipédique se fait par l'Éq. (1), [6] :

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}, \quad (1)$$

où les indices n_x , n_y et n_z sont des nombres entiers et au moins l'un d'entre eux doit être non nul, L_x , L_y et L_z sont les dimensions internes de la cavité, et c_0 est la vitesse du son dans le milieu. La théorie derrière cette formulation suppose que les parois de la cavité sont rigides et qu'il n'y a pas d'absorption acoustique à l'intérieur de la cavité.

La dissipation acoustique à l'intérieur de la boîte liée à la viscosité et conductivité thermique de l'air a été évaluée

en considérant un nombre d'onde complexe [7] et cette dissipation a été trouvée être négligeable par rapport à celle due à la vibration des parois non-rigides.

Dans la perspective d'évaluer l'influence de l'insertion de la forêt de tuyaux à l'intérieur de la boîte, la bibliographie autour des cristaux phononiques pour la diffusion par des corps cylindriques ordonnés a été révisée. Dans l'article de Kushwaha [8] nous trouvons une étude de cas qui s'approche le plus du notre, dans une application visant à rejeter par filtrage certaines bandes de fréquence. La bibliographie autour de la diffusion par des corps cylindriques aléatoires a elle aussi été étudiée. À titre d'exemple nous pouvons citer Linton et Martin [9], qui ont déduit un nombre d'onde effectif (et complexe), lequel traduit la perturbation de la propagation par des diffuseurs cylindriques. Les auteurs considèrent la diffusion du son en 2D par l'incidence d'une onde plane et que les diffuseurs se trouvent en champ libre.

3.1.2 Rayonnement à travers une fente infinie

Dans le but de modéliser le rayonnement se sources planes en forme de fente Mellow et Kärkkäinen [10] dérivent des solutions exactes pour quatre types de fentes infiniment longues. Nous nous appuyerions sur le cas de la "resilient slit in an infinite baffle". Ce type de fente est supposé : 1. être parfaitement flexible ; 2. avoir une masse nulle ; 3 être libre sur ses bords ; 4. être entraînée par une pression p_0 uniformément distribuée qui varie harmoniquement et ainsi rayonne le son des deux côtés dans un milieu acoustique

homogène sans perte. Le facteur de directivité est alors donné par :

$$D(\theta) = -i\sqrt{\pi ka} \sum_{n=0}^N A_n \Gamma\left(n+\frac{1}{2}\right) \frac{2^n J_n(ka \sin \theta)}{(ka \sin \theta)^n}, \quad (2)$$

où k est le nombre d'onde, a est la demi-largeur de la fente, N est la limite de troncature choisie comme $N = 2ka$ (aucune différence discernable n'a pu être vue pour des valeurs plus grandes de N), Γ est la fonction gamma, J_n est la fonction de Bessel d'ordre n du premier type, θ est l'angle d'azimut par rapport au centre de la fente, A_n sont les coefficients des séries de puissance (pour plus de détails, se référer à [10]).

3.2 Protocole expérimental

Dans cette section sont présentés les différents protocoles expérimentaux suivis lors des différentes étapes auxquelles nous nous intéressons.

3.2.1 Champ interne de la boîte

Pour caractériser la réponse modale de la boîte fermée, une source linéique a été utilisée afin de limiter les modes dans la direction y . La source a été placée dans le bord arrière gauche de la boîte (Figure 1). De plus, douze points de mesure équidistants ont été considérés pour tracer un profil modal plus détaillé. Les points de mesure ont été répartis le long de la moitié droite de la paroi frontale et leur hauteur par rapport au fond de la boîte, $y' = 44$ cm, et la distance par rapport à la paroi frontale, $z' = 6$ cm, ont été maintenues constantes. Le premier point de mesure était placé à 2 cm à droite du milieu de la boîte dans la direction x , et les points suivants étaient espacés de 5 en 5 cm les uns des autres dans la même direction. Un seul microphone, qui a été déplacé de la position R1 vers la position R12, a été utilisé.

Le champ interne a été excité avec un signal de séquence de longueur maximale (MLS) de 5 s, répété quatre fois pour chaque point de mesure. Afin d'obtenir les fonctions de transfert H de la boîte, les signaux enregistrés ont d'abord été fenêtrés avec une fenêtre du type "flat top". Ensuite, H a été calculé à partir du rapport entre les spectres d'excitation X et de mesure Y .

3.2.2 Transmission de la façade

Les pressions acoustiques à l'intérieur et à l'extérieur de la boîte avec forêt ont été comparées en fonction des modifications apportées à la façade. Dans cet esprit, un microphone (P_1) a été placé à l'intérieur de la boîte, dans le bord arrière droit, celui opposé à la source, à mi-hauteur. À l'extérieur, un autre microphone (P_2) a été placé à 2,00 m du centre géométrique de la façade. Le champ interne de la boîte était excité par un *sweep* logarithmique de 30 s.

3.2.3 Rayonnement à travers la fente

Dans un premier temps, il a été étudiée la directivité de rayonnement de la fente sans avoir une cavité couplée à celle-

ci. Pour cela, la source a été placée 5 cm derrière la fente pour assurer une distribution homogène de la pression le long de la fente, et la boîte a été remplie de mousse acoustique, afin de limiter l'influence du champ interne de la boîte. Dans un deuxième temps, l'effet de coupler la boîte avec la fente a été étudié. Dans ce sens, il a été considéré le cas de la boîte vide couplée à la fente et de la boîte avec forêt couplée à la fente.

Concernant les mesures, deux microphones ont été utilisés. Le premier était fixé au centre de la fente, considéré comme microphone de référence. Le second a été placé à 20 cm du centre de la fente et tourné dans le plan horizontal chaque $\Delta\theta_{dir} = 5^\circ$.

4 Résultats

4.1 Champ interne de la boîte

Avant tout, des simulations à échelle réelle et à échelle augmentée ont été réalisées dans CATT-Acoustic afin d'estimer la fréquence de Schroeder de la boîte vide, qui a été trouvée être $f_S = 1010$ Hz. Ensuite, les fréquences modales théoriques de la boîte vide ont été calculés à partir de l'Éq. (1) considérant $c_0 = 344,8$ m/s (qui correspond à la vitesse du son à 22,4°C, température moyenne à l'intérieur de la chambre anéchoïque pendant les mesures). Ces résultats préliminaires nous ont menés à limiter l'analyse aux fréquences inférieures à 500 Hz, car à partir de cette fréquence les modes commencent à se chevaucher de plus en plus, de sorte qu'il devient presque impossible de les différencier.

Dans la Figure 2 sont présentées les fonctions de transfert H des douze positions de mesure par rapport à la source. Les courbes en traits pleins et l'axe droit font référence à la boîte vide, pendant courbes en tiret-point et l'axe gauche font référence à la boîte avec forêt. Les fréquences modales théoriques de la boîte vide sont mises en évidence par des lignes verticales pointillées (les modes théoriques non observés expérimentalement ont été omis).

En commençant par la réponse fréquentielle de la boîte vide, le premier point remarquable c'est que les modes dans la direction y ne sont pas présents ou sont au moins assez atténués. Le deuxième point, comme attendu, c'est que les modes axiaux sont ceux qui possèdent en moyenne le plus d'énergie. Un autre point important est que les modes x présentent une grande variabilité d'amplitude, comme le mode $f_{2,0,0}$ à 264 Hz, et que les maxima et les minima correspondent aux comportements modaux attendus. De plus, les modes z présentent une faible variabilité d'amplitude en fonction de la position, comme le mode $f_{0,0,1}$ à 308 Hz, ce qui était également attendu une fois que tous les positions partagent la même coordonnée z .

Un comportement commun à toutes les modes est qu'ils présentent une fréquence plus élevée que celles prédites par l'approche classique théorique. Cela devient clair avec la synthèse présentée dans le Tableau 1, d'où nous pouvons déduire que le décalage moyen des modes expérimentaux par rapport aux modes théoriques est de +9 Hz ($\sigma = \pm 3.4$ Hz). Tels résultats sont en accord avec une étude précédente [11]

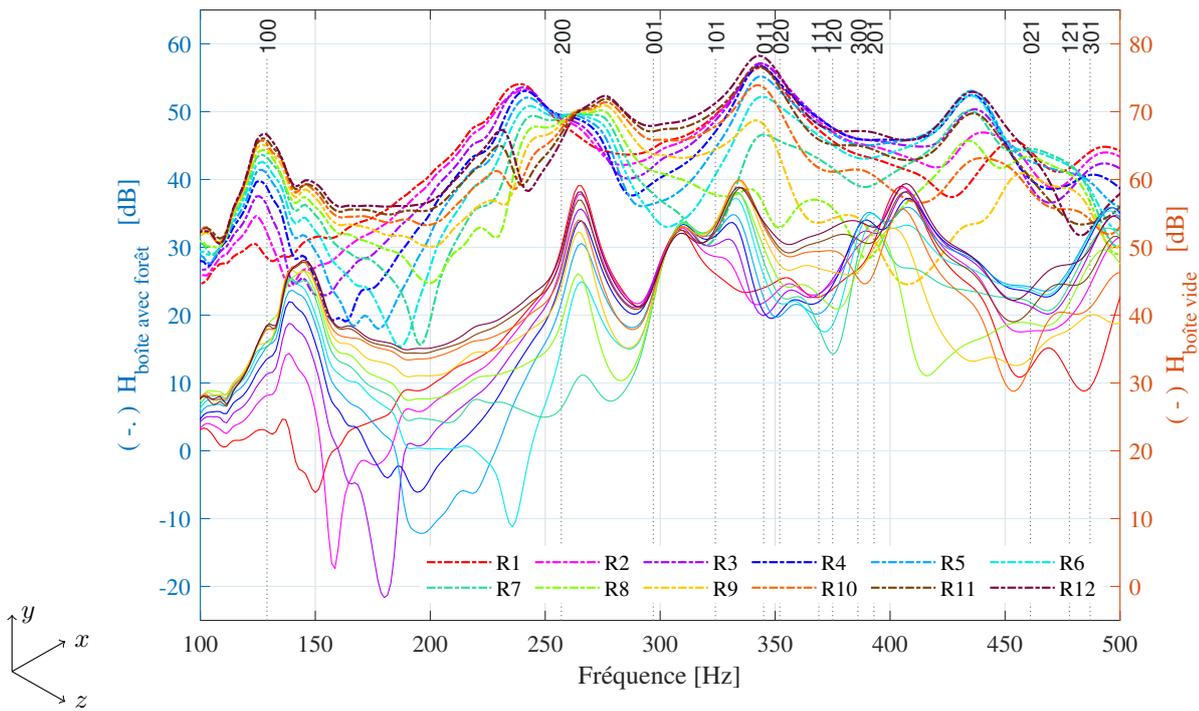


FIGURE 2 – Réponse modale de la boîte, boîte vide vs boîte avec forêt. Lignes tiret-point, boîte avec forêt. Lignes pleines, boîte vide. Les différentes couleurs correspondent aux différentes positions R1 à R12 suivant l’axe x ($0,51L_x, 0,55L_x, 0,59L_x, 0,63L_x, 0,66L_x, 0,70L_x, 0,74L_x, 0,78L_x, 0,81L_x, 0,85L_x, 0,89L_x, 0,93L_x$).

TABLEAU 1 – Premiers modes expérimentaux identifiés sur la Figure 2, boîte vide.

Mode	Fréq. [Hz]		Écart [%]	Positions où sont vérifiés
	Éq. (1)	Exp.		
$f_{1,0,0}$	129	~ 139	+ 7,8	Tous
$f_{2,0,0}$	257	264	+ 2,7	Tous
$f_{0,0,1}$	297	308	+ 3,7	Tous
$f_{1,0,1}$	324	~ 333	+ 2,8	R2-R12
$f_{0,1,1}/f_{0,2,0}$	~ 348	~ 360	+ 3,3	Tous
$f_{1,1,1}/f_{1,2,0}$	~ 372	~ 380	+ 2,1	R10-R12
$f_{3,0,0}$	386	391	+ 1,3	R2-R8
$f_{2,0,1}$	393	406	+ 3,3	R1-R6; R9-R12
$f_{0,2,1}$	461	~ 466	+ 1,1	Tous
$f_{1,2,1}$	478	488	+ 2,1	R9
$f_{3,0,1}$	487	497	+ 2,0	R2-R8; R10-R12

qui a montré qu’une cavité réelle présentait des fréquences modales plus élevées que celles prédites par l’Éq. (1). Ces résultats suggèrent aussi que l’impédance des parois correspond à celle d’une masse, c’est-à-dire, toutes les valeurs possibles des fréquences modales deviennent plus élevées que dans le cas des parois rigides [6].

Le mode $f_{1,0,0}$ aux alentours de 139 Hz montre une réponse chahutée qui semble confirmer l’interférence des modes acoustiques dans la cavité avec des modes vibratoires des parois. À noter que les maxima de la réponse en

fréquence ne coïncident avec la fréquence modale que dans le cas des modes dont la fréquence est suffisamment éloignée de celle de ses voisins.

En analysant la réponse fréquentielle de la boîte avec forêt, nous constatons que la présence des tuyaux modifie dramatiquement la réponse modale de la boîte. Mis à part le premier mode, les modes restantes sont très difficiles à déterminer. Deux effets apparaissent, d’une part un amortissement des modes et d’autre part un abaissement des fréquences modales.

Le Tableau 2 compile les informations extraites de la Figure 2 concernant la boîte avec forêt. Les modes $f_{1,0,0}$, $f_{2,0,1}$ et $f_{3,0,1}$ ont pu être identifiés en raison de leurs similitudes avec les mêmes modes dans la boîte vide. De plus, trois nouveaux modes ont été remarqués dans la boîte avec forêt, appelés ici respectivement 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} modes. Mis à part le 4^{ème} mode, qui pourrait être le mode $f_{1,0,1}$ décalé de 57 Hz en dessous, les 2^{ème} et 3^{ème} modes sont difficiles à identifier avec certitude. Une modélisation incluant l’effet de la forêt de tuyaux diffuseurs dans la cavité et celui des vibrations des parois permettra de mieux interpréter les résultats obtenus.

4.2 Transmission de la façade

La Figure 3 montre la transmission du son entre champ interne et champ externe, sous la forme d’une différence de niveau SPL entre P_2 et P_1 (les détails des mesures se trouvent dans la Sous-section 3.2.2). Sans surprise, c’est lorsque la façade se trouve fermée que la transmission est la moins

TABLEAU 2 – Premiers modes expérimentaux identifiés sur la Figure 2, boîte avec forêt.

Modes	Fréq. [Hz]	Écart [%]	Positions où sont vérifiés
$f_{1,0,0}$	~ 126	- 9,3	Tous
2 ^{ème}	230	—	R10-R12
3 ^{ème}	~ 243	—	R1-R9
4 ^{ème}	~ 276	—	R7-R12
$f_{2,0,1}$	343	- 15,5	R1-R7; R9-R12
$f_{3,0,1}$	~ 436	- 12,3	R2-R8; R10-R12

Écart par rapport aux modes expérimentaux de la boîte vide.

efficace. En ajoutant une ouverture dans la façade (façade avec fente), et ensuite en lui enlevant par complet (façade ouverte), la transmission devient plus efficace.

La transmission à travers la façade fermée (voisine de - 40 dB) montre la transparence globale des parois de la boîte. L'ouverture d'une fente présente un comportement proche de celui que la théorie prédit [10] : une croissance de + 20 dB/décade jusqu'à 2,7 kHz, qui correspond à $ka = 1$ (a étant la largeur de la fente), puis une valeur indépendante de la fréquence au dessus de 3 ou 4 kHz. Dans les fréquences inférieures à 1 kHz, la chute (+ 20 dB/décade) semble progressivement compensée par la transmission par les parois, dont la courbe se rapproche de celle obtenue pour la façade fermée.

La façade fermée présente, elle aussi, une transmission qui croît à + 20 dB/décade jusqu'à environ 1 kHz, bande à partir de laquelle la transmission devient indépendant de la fréquence. En dernier lieu, mais pas moins important, ces résultats semblent cohérents avec ceux obtenus dans les orgues mesurés par [1, 2].

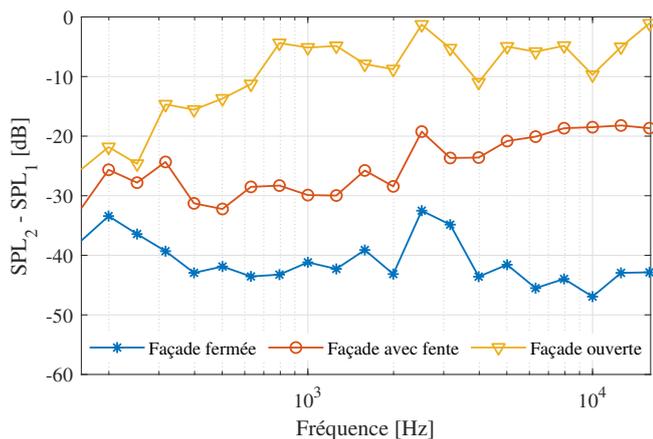


FIGURE 3 – Transmission par la façade. Les résultats sont filtrés par bandes de 1/3 d'octave.

4.3 Rayonnement à travers la fente

Dans la Figure 4, les résultats expérimentaux pour la directivité de rayonnement de la fente sont comparés avec les

prédictions issues l'Éq. (2). L'une des premières remarques autour des graphiques expérimentaux c'est que ceux ne sont pas symétriques. Cela est plutôt vrai dans les cas où nous considérons la présence de la boîte et dans lesquels la source est placée proche d'un bord, de façon qu'il existe un angle et une distance entre la source et la fente. En effet, les résultats suggèrent l'existence d'une certaine contribution du son direct de la source entre 90° et 170°. Ensuite, considérant les résultats sans boîte, nous constatons une augmentation de la directivité de rayonnement avec la fréquence similaire à la théorie de fente infinie [10], confirmant le comportement observé en transmission (Figure 3).

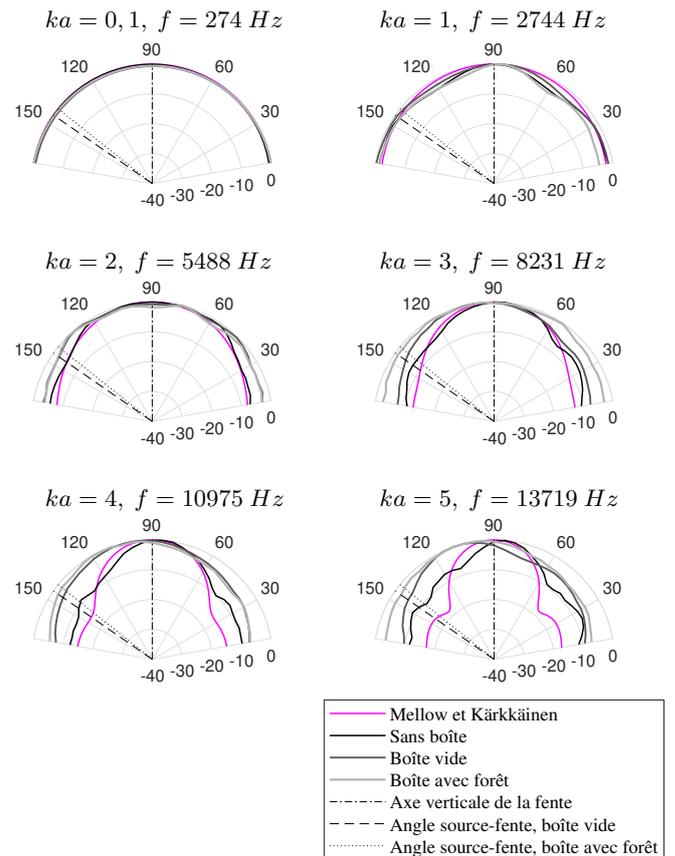


FIGURE 4 – Rayonnement de la fente, modèle théorique vs résultats expérimentaux. Les résultats expérimentaux sont filtrés par bandes de 1/3 d'octave; $a = 2$ cm correspond à la demie-largeur de la fente.

En complément aux résultats précédents des Figures 2, 3 et 4, la Figure 5 présente globalement le comportement du système en comparant la pression rayonnée à travers la fente dans différentes conditions. Certes, le comportement observé est très similaire au rayonnement de la source en champ libre, notamment pour la condition sans boîte. En présence de la boîte, l'effet des résonances apparaît, puisque la pression rayonnée montre le comportement modal dû à la boîte aux basses fréquences. Enfin, la présence de la forêt de tuyaux dans la boîte perturbe la réponse modale par un décalage des fréquences modales et un amortissement accru des modes.

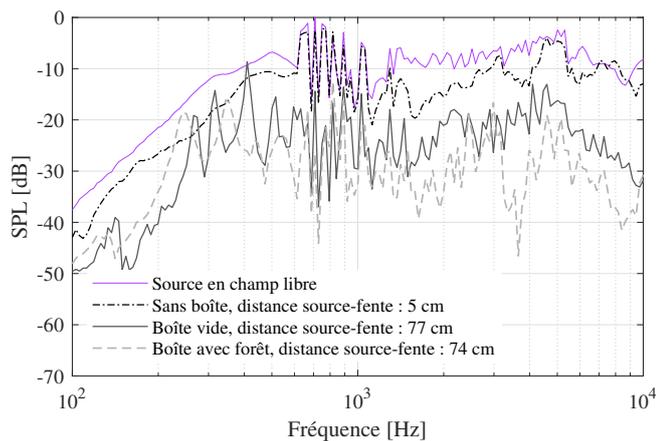


FIGURE 5 – SPL mesuré à 20 cm du centre de la fente. Les résultats sont filtrés par bandes de 1/24 d'octave et normalisés par rapport à la réponse de la source en champ libre.

5 Conclusions

Nous avons proposé une analyse de l'influence du buffet sur le rayonnement de l'orgue. Cette analyse repose sur la comparaison entre des mesures réalisées en chambre anéchoïque sur une maquette de buffet d'orgue ainsi que sur l'analyse théorique des différents éléments qui participent à la réponse acoustique du buffet. D'une part le comportement du buffet en tant que cavité résonante a été étudié. D'autre part, le rayonnement à l'extérieur du buffet a été approché au travers de l'étude du rayonnement par une fente. L'analyse des résultats obtenus nous permet suggérer que :

(1) Dans une cavité parallélépipédique dont les parois sont non-rigides, les fréquences modales réelles se trouvent modifiées par rapport à celles prévues par la théorie classique.

(2) L'insertion de diffuseurs cylindriques à haute densité à l'intérieur d'une cavité parallélépipédique modifie la réponse modale de la cavité : en amortissant et en décalant les fréquences modales au-dessous de celles observées dans la cavité vide. De plus, il semble que cette modification ferait disparaître certains modes et apparaître d'autres non existants auparavant.

(3) Considérant une incidence normale du son derrière une fente, le modèle de Mellow et Kärkkäinen [10] fournit une approximation raisonnable de la directivité de rayonnement à travers la fente. Les différences observées par rapport aux mesures peuvent s'expliquer par la finitude et par la flexibilité de la paroi frontale où se trouve la fente.

(4) La position de la source à l'intérieur de la boîte joue un rôle fondamental dans la directivité de rayonnement de la fente à l'extérieur de la boîte.

(5) Une fois que la fente est couplée avec une cavité, le modèle de fente infinie [10] ne donne plus une approximation raisonnable de la directivité de rayonnement. Plus le champ incident devient complexe (insertion de la forêt de tuyaux dans la boîte), moins nous observons le comportement attendu selon le modèle cité ci-dessus.

En sus, une étude plus approfondie autour des modes de vibration et des impédances des parois aidera à mieux comprendre la réponse modale de la boîte vide. De même, la modélisation de la forêt de tuyaux ordonnés en milieu fini aidera à prévoir la réponse modale d'une boîte expressive, c'est qui a des implications pratiques (facture d'orgues). Finalement, l'interaction des fentes multiples, ainsi que les influences d'une densité variable des tuyaux et d'un nombre variable de parois dans le rayonnement de la boîte, traitées dans l'article-frère [4], ferment la boucle de cette étude.

Remerciements

Les auteurs remercient le DIM *Matériaux anciens et patrimoniaux* pour le soutien financier du projet RAOH (Rayonnement acoustique des orgues historiques) et Laurent Quartier pour son soutien dans le développement du buffet d'orgue simplifié.

Références

- [1] J. Braasch, Acoustical measurements of expression devices in pipe organs, *The Journal of the Acoustical Society of America* **123**(3), 1683-1693 (2008).
- [2] P. Luizard, et C. d'Alessandro, Effet des jalousies du récit d'orgue comme moyen d'expressivité musicale, *Congrès Français d'Acoustique, CFA 2018*, 243-247 (2018).
- [3] J. Angster, S. Pitsch, Z. Dubovski, P. Leistner, et A. Miklós, Research organ for pipe organ research at the fraunhofer ibp in stuttgart, *AIA-DAGA Conferece, Merano, Italie*, 295-298 (2013).
- [4] G. Villegas C., P.M.M. Dal Moro, B. Fabre, et B.F.G. Katz, Radiation patterns of a multiple slit system and applications to organ buffet modeling, *Congrès Français d'Acoustique, CFA 2022*.
- [5] R. H. Bolt, Note on normal frequency statistics for rectangular rooms, *The Journal of the Acoustical Society of America* **18**(1), 130-133 (1946).
- [6] H. Kuttruff, *Room acoustics*, Applied Science Publishers, Barking (1979).
- [7] M. Bruneau, *Manuel d'acoustique fondamentale*, Hermes, Paris (1998).
- [8] M. S. Kushwaha, Stop-bands for periodic metallic rods : Sculptures that can filter the noise, *Applied Physics Letters* **70**(24), 3218-3220 (1997).
- [9] C. Linton, et P. Martin, Multiple scattering by random configurations of circular cylinders : Second-order corrections for the effective wavenumber, *The Journal of the Acoustical Society of America* **117**(6), 3413-3423 (2005).
- [10] T. Mellow, et L. Kärkkäinen, On the sound fields of infinitely long strips, *The Journal of the Acoustical Society of America* **130**(1), 153-167 (2011).
- [11] T. Pàmies, J. Romeu, M. Genescà, et A. Balastegui, Sound radiation from an aperture in a rectangular enclosure under low modal conditions, *The Journal of the Acoustical Society of America* **130**(1), 239-248 (2011).