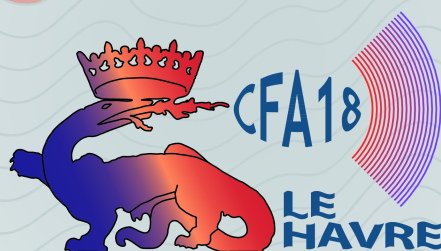


CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



Effet des jalousies du récit d'orgue comme moyen d'expressivité musicale

P. Luizard^a et C. d'Alessandro^b

^aAudio Communication Group, TU-Berlin, Sekretariat EN-8, Einsteinufer 17c, 10587 Berlin, Allemagne

^bSorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut Jean Le Rond d'Alembert, F-75005 Paris, France

paul.luizard@campus.tu-berlin.de

La boîte expressive de l'orgue permet de moduler le son rayonné par l'instrument, en ouvrant ou fermant des volets (*jalousies*) du buffet qui contient les tuyaux. Le but de la présente étude est de mesurer l'effet acoustique de la boîte expressive, afin de comprendre quel sorte d'expression est possible. Des enregistrements calibrés simultanés ont été réalisés dans le buffet et hors du buffet pour diverses combinaisons de jeux et diverses positions des jalousies. L'instrument étudié est le grand orgue de l'église Sainte Élisabeth (3 claviers manuels et pédalier, 39 jeux, 16' en montre, récit expressif, 1853, Louis Suret, restauration 1999, Giroud) à Paris. Toutes les notes de tous les jeux du récit ainsi que des tutti et des clusters ont été mesurés. Les analyses montrent une atténuation maximale d'environ 10% (en dB SPL) dans la salle lorsqu'on ferme les jalousies, correspondant à un effet d'éloignement de la source sonore. Un autre effet notable, mesuré par un facteur de richesse spectrale et le centre de gravité spectral, est le changement de timbre entre les conditions fermé/ouvert. L'effet de la fermeture est alors d'atténuer les hautes fréquences, ce qui est particulièrement pertinent pour les registrations utilisant des jeux d'anches ou des gambes, riches en harmoniques d'ordre élevé. Ces effets (niveau et équilibre spectral) semblent moins importants que les changements entre *piano* et *forte* au piano ou dans le chant. La boîte d'expression ne permet pas de rendre l'orgue aussi expressif de ces instruments.

1 Introduction

L'idée d'enfermer la tuyauterie de l'orgue dans une buffet équipé de volets ou d'une paroi mobile apparaît au 17^e siècle en Espagne (orgue de fra José de Echevarra, San Francisco de Vitoria, 1665). L'ouverture ou la fermeture de cette "boîte" permet avec des moyens mécaniques simples de changer la sonorité des tuyaux. L'effet obtenu, boîte fermée, évoque un éloignement de la source sonore, d'où le nom d'"écho" donné à ce système. D'Espagne, l'idée passe en Angleterre au début du 18^e siècle (orgue d'Abraham Jordan, Saint Magnus, London, 1712 [7]) avec une terminologie différente. Le mot de "swell box" évoque une utilisation plus dynamique (enflément) avec une ouverture fermeture graduelle qui rappelle le crescendo-decrescendo d'orchestre. L'Angleterre adapte d'ailleurs le système aux autres instruments à clavier, comme le clavecin ou le pianoforte. C'est probablement de cette façon que la boîte expressive gagne le continent à la fin du 18^e siècle. Un nouveau mot apparaît, le "récit expressif", qui comme le "swell box" anglais ne manque pas d'accentuer l'aspect dynamique ("expressif") du système (Sébastien Erard et John Abbey, Saint Denis, 1827), en rajoutant également une connotation vocale. Finalement, la boîte expressive devient une composante obligée de l'orgue orchestral américain et de l'orgue de cinéma (dans lesquels plusieurs plans sonores sont entièrement "en boîte", avec de très efficaces volets mobiles), puis du style "international" de l'orgue de concert contemporain, avec ses effet de crescendo-decrescendo d'orchestre.

Dans une étude récente [1], l'effet acoustique du récit d'un orgue de concert allemand moderne a été mesuré, et comparé à ceux d'autre moyens expressifs: la pédale de crescendo (qui contrôle la registration en ajoutant ou retirant des jeux) et la variation de vent pour des anches libres d'harmonium. Les résultats montrent que l'effet de la boîte expressive est beaucoup moins important que celui de la pédale de crescendo. Il permet surtout d'augmenter le niveau sonore, mais sans permettre un véritable changement de timbre comme la pédale de crescendo. Dans cette étude, les variations acoustiques sont étudiées à l'aide de paramètres physiques, comme le niveau de pression sonore ou le spectre d'amplitude.

Notre étude traite de l'effet acoustique de la boîte d'expression avec davantage de détail. Les questions posées portent sur la variation de niveau sonore, mais aussi la variation de timbre. De plus toutes les notes de

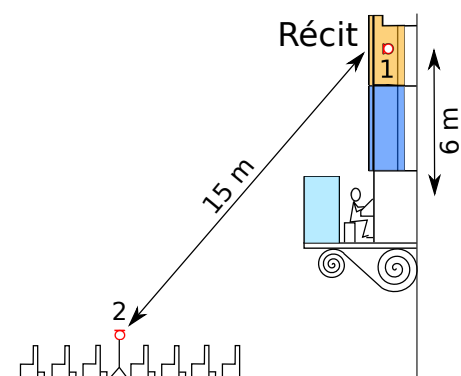


Figure 1: Vue schématique de l'église en coupe. Le récit d'orgue est la partie supérieure où se trouve le micro 1 (*grand orgue* juste sous le récit et *positif de dos* derrière l'organiste). Le micro 2 se trouve au niveau du public dans la nef, à 15 m du récit.

différents jeux sont analysées, avec des positions de mesures différentes: dans la salle, à la place d'un auditeur, et à l'intérieur même du récit. Enfin, une étude globale en termes de fonction de transfert complète l'étude note à note.

2 Matériau sonore

L'orgue étudié date de la période romantique française du 19^e siècle (42 jeux, 3 claviers et 1 pédalier, construit en 1852 dans l'église Sainte Élisabeth, Paris, France). [3] La partie appelée *récit* correspond au troisième clavier et contient 12 jeux composés de 17 rangs de tuyaux, pour 54 notes (Do1 au Fa5). Jeux de fonds : Bourdon 8', Cornet V (5 rangs), Flûte allemande 8', Flûte octaviante 4', Gambe 4', Gambe 8', Voix céleste 8'. Jeux d'anches : Clarinette 8', Cor anglais 16', Hautbois 8', Trompette 8', Voix humaine 8'.

Deux microphones omnidirectionnels sont utilisés pour réaliser des mesures calibrées. L'un (DPA 4006-TL) est placé dans le buffet du récit, au milieu de l'espace occupé par les rangs de tuyaux étudiés, l'autre (Earthworks QTC-40) est situé dans la nef à l'endroit où se trouve le public, à environ 15 m du récit. Cette disposition est illustrée sur la Figure 1.

Les enregistrements sont effectués via une carte d'acquisition (RME Fireface 800, 32 bits, 48 kHz) dont la réponse en fréquence varie de 0.1 dB entre 5 Hz et 21 kHz. Bien que les enregistrements soient effectués de

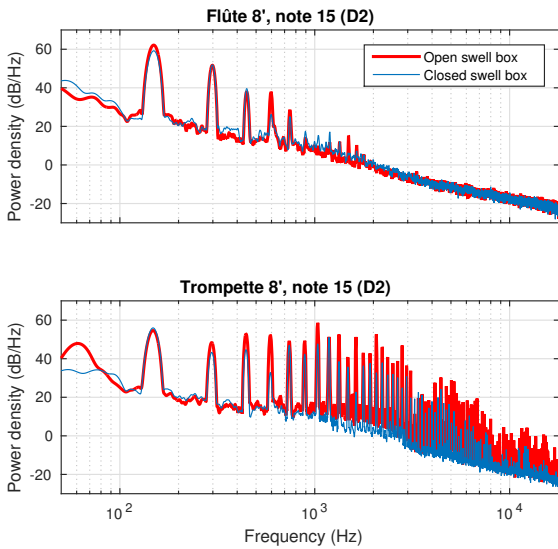


Figure 2: Densité spectrale de puissance (DSP) de la note 15 (Re2) pour les jeux Flûte 8' (haut) et Trompette (bas) en conditions ouvert et fermé.

nuît, le niveau de bruit de fond moyen est relativement élevé ($L_n = 48$ dB) à cause de la soufflerie électrique de l'orgue ainsi que du bruit de fond de la ville. Cela réduit d'autant le rapport signal-sur-bruit obtenu et peut s'avérer problématique pour les notes les plus faibles des jeux de fonds.

Des gammes chromatiques ont été enregistrées (environ 2 s répétées 2 fois pour chacune des 54 notes du clavier) pour chaque jeu, en conditions ouvert et fermé. Ces dernières correspondent à l'état des jalousies du buffet du récit. En effet, une pédale d'expression situé au pied de l'organiste permet l'ouverture et la fermeture de manière continue d'une partie du buffet (les jalousies) qui entoure les rangs de tuyaux et constitue le récit de l'orgue. Les jeux Cor anglais, Flûte 4', Gambe 4' et Voix céleste ont été enregistrés en condition ouvert seulement car ils sont presque identiques aux jeux Hautbois, Flûte 8', gambe 8' and gambe 8' respectivement, dans certains cas à une octave près. De plus, des *clusters* du clavier entier (toutes notes jouées simultanément) joués en Tutti (les 12 jeux simultanément) sont enregistrés en conditions ouvert et fermé, ainsi qu'en mouvement d'ouverture et fermeture.

2.1 Notes isolées pour chaque jeu

Chaque jeu est analysé en termes de niveau de pression acoustique (SPL) et de caractéristiques spectrales. Un exemple est donné pour les jeux Flûte 8' et Trompette qui sont respectivement des jeux de fond et d'anche typiques. La Figure 2 montre les spectres calibrés de ces jeux pour la note Re2 (note 15 de la gamme) en conditions ouvert et fermé. La Flûte est un jeu doux et son spectre ne présente que quelques harmoniques au-dessus d'un fondamental fort. Au contraire, la Trompette possède un fondamental plus faible et de nombreuses harmoniques.

Les deux effets principaux de la boîte expressive portent sur le niveau sonore et sur l'équilibre spectral. Ceci peut être quantifié à l'aide de descripteurs tels que SPL, centre de

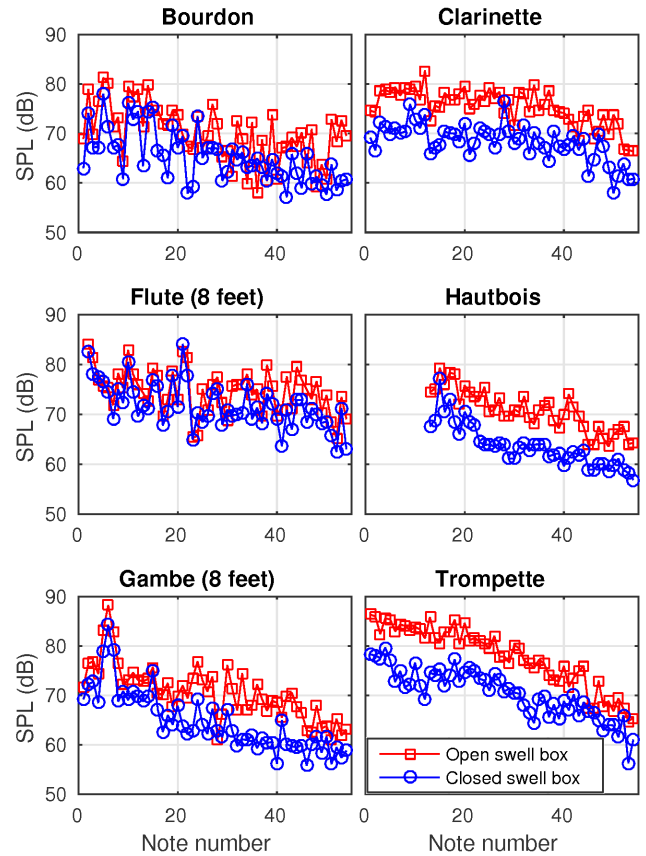


Figure 3: Niveau de pression acoustique (SPL) pour 3 jeux de fonds (colonne gauche) et 3 jeux d'anches (colonne droite) mesurés au niveau du public.

gravité spectral (SC) [8], ce dernier étant estimé par

$$SC = \frac{\sum_{i=1}^N f(i)E(i)}{\sum_{i=1}^N E(i)}, \quad (1)$$

où $E(i)$ est l'énergie spectrale dans la i^e bande de fréquence. Une caractérisation plus large des sons produits par ces jeux, surtout du point de vue spectral relatif au timbre, est effectuée par le calcul du facteur de richesse harmonique (HRF). Ce descripteur audio a notamment été utilisé comme estimateur de la qualité vocale dans une étude précédente [2]. Le HRF est calculé d'après la détection de N pics au sein du spectre, comme le rapport de l'énergie des harmoniques sur celle du fondamental :

$$HRF = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=2}^N E_p(i)}{E_p(1)} \right), \quad (2)$$

et exprimé en dB.

Ces trois descripteurs audio sont estimés pour chaque note de chaque jeu pour chaque condition d'ouverture des jalousies. Les valeurs correspondant à trois jeux de fonds (Bourdon, Flûte 8', Gambe 8') et trois jeux d'anches (Clarinette, Hautbois, Trompette) représentatifs sont présentés sur les Figures 3, 4, and 5. Ces résultats apparaissent selon les deux groupes relatifs au principe physique de production sonore, les fonds et les anches, afin de pouvoir observer leurs caractéristiques respectives.

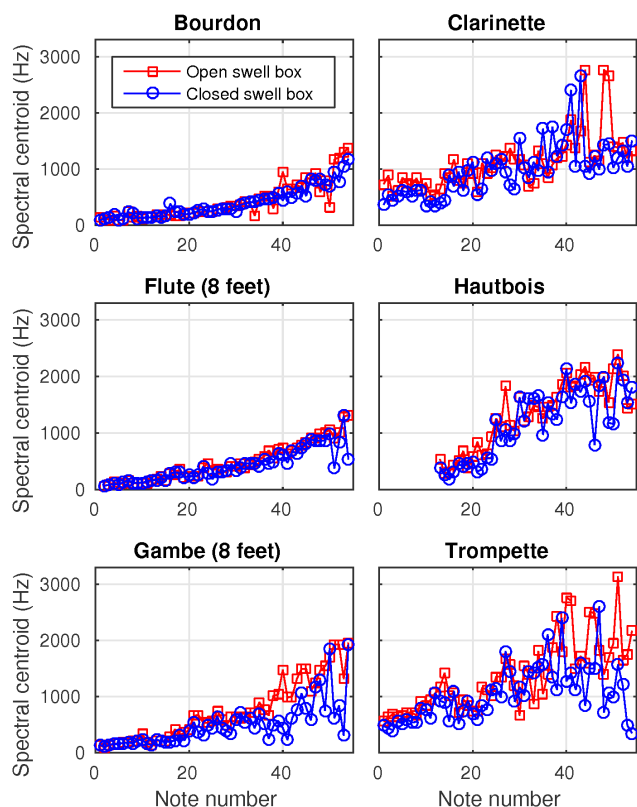


Figure 4: Centre de gravité spectral (SC) pour 3 jeux de fonds (colonne gauche) et 3 jeux d’anches (colonne droite) mesurés au niveau du public.

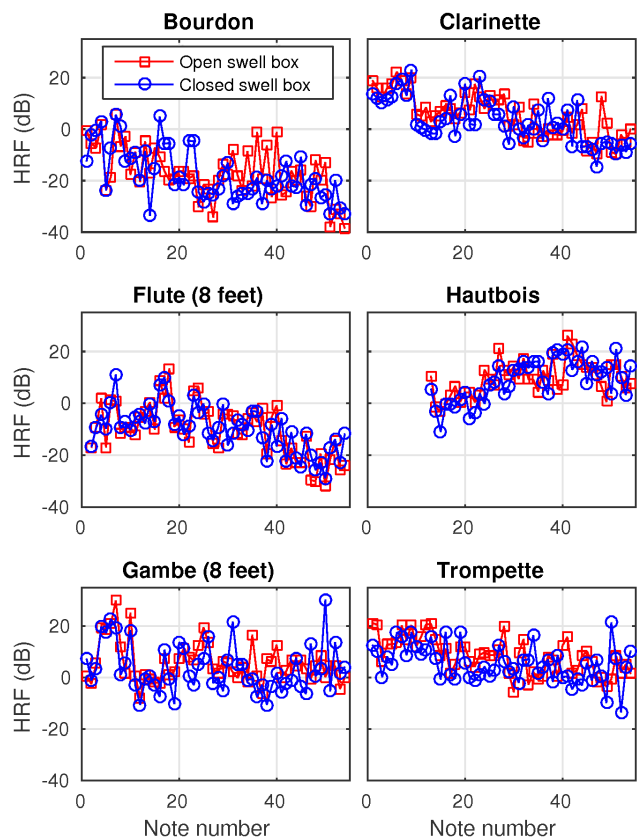


Figure 5: Facteur de richesse harmonique (HRF) pour 3 jeux de fonds (colonne gauche) et 3 jeux d’anches (colonne droite) mesurés au niveau du public.

Les valeurs des descripteurs audio moyennées sur la gamme chromatique ainsi que les différences relatives de ces descripteurs selon les conditions ouvert et fermé sont présentées dans le Tableau 1. Les différences relatives sont estimées selon la formule $(X_{ouvert} - X_{ferme})/X_{ferme}$, i.e. des valeurs relatives à la condition de jalousies fermées, par opposition à des différences absolues. Tous les descripteurs sont influencés, à un certain degré, par l’ouverture et la fermeture des jalousies.

2.2 Clusters de tutti

Des clusters de tutti (toutes les notes de tous les jeux joués simultanément) ont été enregistrés. L’objectif de ces mesures est d’obtenir des fonctions de transfert en comparant les sons enregistrés dans le récit et dans le public, pour différentes conditions d’ouverture. La boîte expressive est alors considérée comme un filtre, un système dont la fonction de transfert entre les tuyaux et le public est pilotée par l’ouverture des jalousies. Le spectre des clusters est large bande, avec une dynamique d’environ 35 dB entre 50 Hz et 5 kHz.

Les valeurs des descripteurs audio estimés à l’intérieur et à l’extérieur du récit ouvert et fermé se trouvent dans le Tableau 1. Comme la surface potentiellement ouverte est relativement réduite (environ 2 m² au maximum, i.e. 7% des 28 m² de surface totale du récit), le degré d’ouverture affecte peu le champ sonore à l’intérieur, alors que la variation est plus importante à l’extérieur.

3 Discussion

Les principaux effets de l’ouverture et fermeture des jalousies du récit concernent la variation de niveau sonore (variation de SPL de l’ordre de 10% pour les mesures de clusters) et de l’équilibre spectral (variation du centre de gravité spectral de l’ordre de 35% pour les mesures de clusters). Ces mesures sont cohérentes avec une étude précédente [1].

La Figure 3 montre une différence de comportement selon la nature du tuyau, i.e. famille des fonds ou des anches. L’effet de la fermeture des jalousies en termes de niveau sonore est plus important sur les anches. Ceci peut être expliqué par le fait que ces dernières possèdent un spectre plus riche et que la boîte fermée atténue davantage les hautes fréquences. Ainsi la variation de SPL du son transmis au public entre les conditions ouvert et fermé est plus audible pour les jeux d’anche.

Les Figures 4 et 5 montrent un effet moins marqué entre les tuyaux de fond et d’anche, traduisant un effet sur l’équilibre spectral moins important que l’effet sur le niveau sonore. Le Tableau 1 qui présente les valeurs moyennes et les différences relatives pour les conditions ouvert et fermé permet de faire apparaître des tendances. Notons que les valeurs de HRF sont négatives pour le Bourdon et la Flûte 8’. Cela traduit le fait que le fondamental est contient une quantité d’énergie plus importante que les harmoniques faibles et peu nombreuses, comme le montre la Figure 2. Alors que la variation de SPL entre les conditions de fermeture des jalousies est d’environ 10% pour les jeux étudiés, on constate une dispersion plus importante pour les descripteurs spectraux avec des différences relatives

TABLEAU 1: Niveau de pression acoustique (SPL), centre de gravité spectral (SC) et facteur de richesse harmonique (HRF) pour les 6 jeux du récit considérés. Les valeurs sont issues de moyennes sur la gamme chromatique (54 notes) ainsi que de clusters de tutti (toutes notes et tous jeux simultanément) mesurés au niveau du public et dans le récit, dans les conditions ouvert et fermé. Les différences relatives (RD) sont les différences des moyennes des valeurs isolées en conditions ouvert et fermé, divisées par les valeurs en condition fermé.

Jeux	Position	Ouverture	SPL (dB)	RD (%)	SC (Hz)	RD (%)	HRF (dB)	RD (%)
Bourdon	Public	Fermé	65.3		391.3		-17.5	
Bourdon	Public	Ouvert	70.1	7.4	416.5	6.4	-16.8	-4.2
Flûte 8'	Public	Fermé	71.8		418.9		-9.6	
Flûte 8'	Public	Ouvert	74.7	4.1	480.9	14.8	-10.1	5.0
Gambe 8'	Public	Fermé	64.8		493.5		3.7	
Gambe 8'	Public	Ouvert	70.7	9.1	735.9	49.1	5.8	55.9
Clarinette	Public	Fermé	68.3		988.6		3.4	
Clarinette	Public	Ouvert	75.3	10.3	1118.8	13.2	5.7	68.9
Hautbois	Public	Fermé	63.6		1176.8		8.9	
Hautbois	Public	Ouvert	70.7	11.1	1346.0	14.4	9.6	7.6
Trompette	Public	Fermé	70.5		1050.8		5.5	
Trompette	Public	Ouvert	77.9	10.5	1370.0	30.4	8.5	54.3
Tutti (cluster)	intérieur boîte	Fermé	113.6		914.5		-	-
Tutti (cluster)	intérieur boîte	Ouvert	112.7	-0.7	945.3	3.4	-	-
Tutti (cluster)	Public	Fermé	82.2		508.5		-	-
Tutti (cluster)	Public	Ouvert	89.8	9.4	694.2	36.5	-	-

d'environ 5% à 50%, pour les fonds comme pour les anches. Ainsi l'équilibre spectral ne semble pas être un paramètre aussi efficace que le niveau sonore pour caractériser le niveau d'ouverture des jalousies.

La fermeture des jalousies provoque une atténuation du niveau sonore et une coloration plus mate du son. Cet effet est similaire à celui engendré par l'éloignement de la source par rapport au récepteur. C'est probablement la raison pour laquelle les premiers dispositifs de tuyaux confinés étaient appelés "écho". Ces premiers dispositifs étaient principalement utilisés sur deux positions : "ouvert" et "écho" (fermé).

4 Conclusion

Cette première étude montre que l'effet de la boîte d'expression est surtout de varier le niveau sonore. Cette variation est nettement perceptible, mais reste tout de même modeste, au moins pour l'instrument étudié ici. D'autres instruments, comme les orgues de théâtre ou de cinéma américains pourraient montrer des variations plus importantes, car des technologies de volets plus sophistiquées ont été développées au cours du 20^e siècle (doubles parois, joints plus étanches). Cependant, l'atténuation par une paroi n'est pas de nature à changer le contenu spectral du son de manière aussi importante que le niveau sonore global. Ainsi l'effet d'expression obtenu s'apparente à celui du clavicorde [5], ou des petit et grand jeux du clavecin [10], davantage qu'au changement de timbre qu'autorise la compression du feutre dans le cas du marteau de piano [6,9], ou la variation de tension dans le cas de l'effort vocal [4].

Il serait intéressant de considérer également les paramètres perceptifs comme la sonie ou la brillance [11], ce que nous réservons à une étude ultérieure.

References

- [1] J. Braasch. Acoustical measurements of expression devices in pipe organs. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123(3):1683–1693, 2008.
- [2] D. G. Childers and C. K. Lee. Vocal quality factors: Analysis, synthesis, and perception. *the Journal of the Acoustical Society of America*, 90(5):2394–2410, 1991.
- [3] C. d'Alessandro. Orgue, musiques et musiciens à Sainte Elisabeth (Organ, Music and Musician at Sainte Elisabeth). *La Flûte Harmonique*, 91, 2010.
- [4] B. Doval, C. d'Alessandro, and N. Henrich. The spectrum of glottal flow models. *Acta acustica united with acustica*, 92(6):1026–1046, 2006.
- [5] Christophe d'Alessandro. On the dynamics of the clavichord: From tangent motion to sound a. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(4):2173–2181, 2010.
- [6] D. E. Hall and A. Askenfelt. Piano string excitation v : Spectra for real hammer and strings. *Journal of the Acoustical Society of America*, 83:1627–1638, 1988.
- [7] W. D. Jordan. The first english swell-box: An open case. *Organ Yearbook*, 31:25–47, 2002.
- [8] S. McAdams, J. W. Beauchamp, and S. Meneguzzi. Discrimination of musical instrument sounds resynthesized with simplified spectrotemporal parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(2):882–897, 1999.
- [9] C. Palmer and J.C. Brown. Investigations in the amplitude of sounded piano tones. *Journal of the Acoustical Society of America*, 90:60–66, 1991.
- [10] A. Paté, J.-L. Le Carrou, A. Givois, and A. Roy. Influence of plectrum shape and jack velocity on the sound of the harpsichord: An experimental study. *Acoustical Society of America Journal*, 141:1523–1534, March 2017.
- [11] H.F. Pollard. Tonal portrait of a pipe organ. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(1):360–370, 1999.